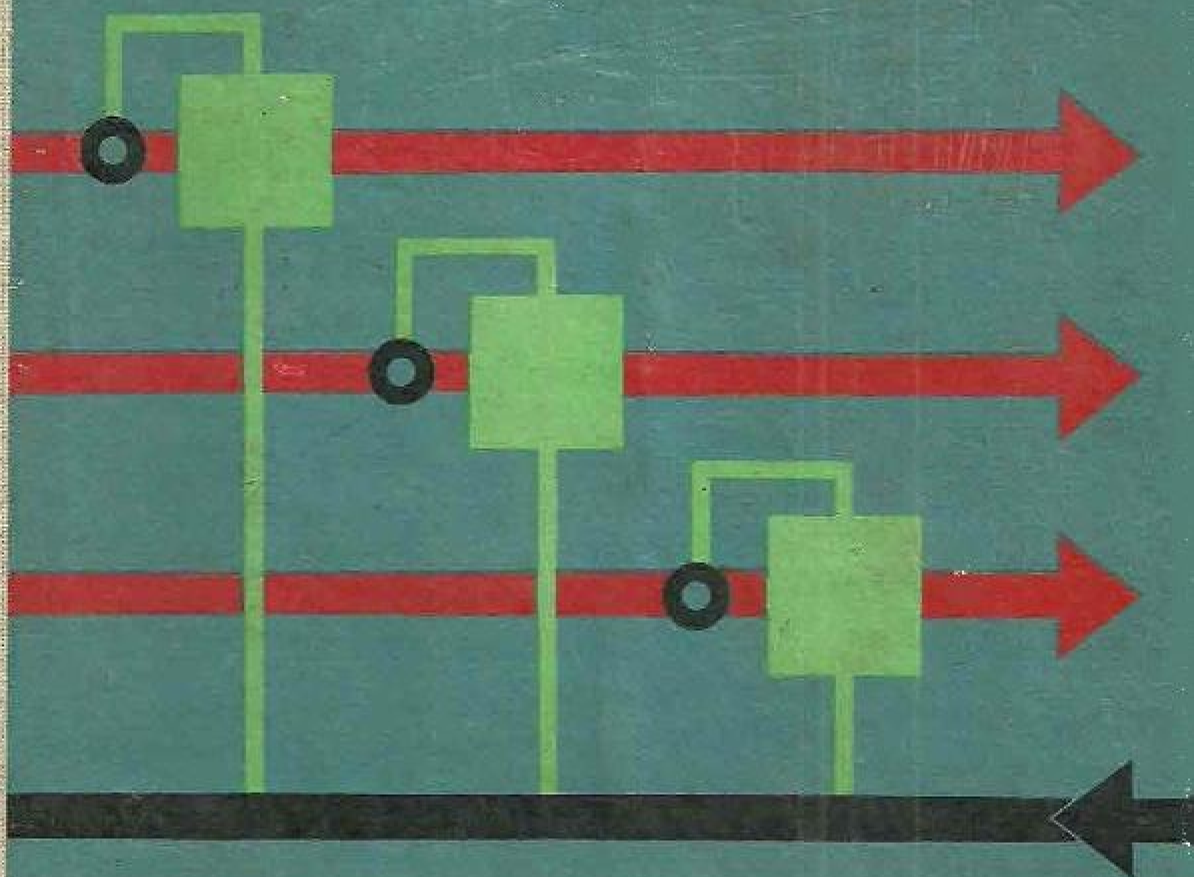
GH. IACOBESCU
ST. POPESCU
A. BACIU
A. CIAMBA

CONTROLUL CALITĂȚII LUCRĂRILOR ÎN ENERGETICĂ

MANUAL PENTRU LICEE DE SPECIALITATE, ANII III—V ȘI ȘCOLI DE MAIȘTRI



prof. dr. ing. GH. IACOBESCU
conf. dr. ing. ST. POPESCU
ing. A. BACIU
ing. A. CIAMBA

CONTROLUL CALITĂȚII LUCRĂRILOR ÎN ENERGETICĂ

MANUAL PENTRU LICEE DE SPECIALITATE ANII III—V
(SPECIALIZĂRILE: ELECTRO- HIDRO- ȘI MECANOENERGETICĂ) ȘI ȘCOLI DE MAIȘTRI



EDITURA DIDACTICĂ ȘI PEDAGOGICĂ, BUCUREȘTI

C A P I T O L U L 1

NOȚIUNI INTRODUCTIVE

A. CONSIDERAȚII GENERALE

Energia electrică este în prezent unul dintre factorii determinanți în dezvoltarea societății umane. Toate progresele remarcabile din ultimul secol, începînd cu dezvoltarea industriei și transporturilor, a medicinii și telecomunicațiilor și pînă la cele mai noi cuceriri ale științei în domeniul calculatoarelor electronice, al zborurilor interplanetare sau al folosirii energiei atomice în scopuri pașnice, ar fi fost imposibil de realizat fără utilizarea energiei electrice. Se poate afirma deci că realizarea unor centrale de producere a energiei electrice, a unor rețele de transport și distribuție a acesteia, interconectate sub forma unor sisteme energetice naționale sau chiar internaționale, a asigurat o creștere considerabilă a progresului tehnic și a civilizației omenirii.

B. PARTICULARITĂȚILE ENERGIEI ELECTRICE

Spre deosebire de alte produse materiale, energia electrică prezintă anumite particularități, care impun adoptarea unor exigențe sporite în ce privește calitatea acesteia. Aceste particularități ale energiei electrice pot fi sintetizate astfel:

— energia electrică este produsă, transformată, distribuită și consumată practic simultan; ca urmare, sînt necesare legături electrice permanente și sigure între producătorul și consumatorul energiei electrice; orice întrerupere a acestor legături conduce inevitabil la întreruperea furnizării acesteia, adică se întrerupe atît utilizarea cît și producerea energiei electrice aferente consumului respectiv;

— energia electrică, deși este o formă de manifestare a materiei, nu poate fi evaluată pe baza sistemelor convenționale de măsurare materiale (mecanice); energia electrică își face simțită prezența numai prin efectele produse (mecanice, magnetice, calorice etc.), deci, ea reclamă o serie de aparate și metode de măsurare specifice acestui domeniu;

— datorită unei interdependențe strînse între producătorul și consumatorul de energie electrică, calitatea energiei electrice este determinată nu numai de condițiile de funcționare ale producătorului (centralele electrice), ci și de cele ale consumatorului; efectele negative (de exemplu, scăderile de tensiune sau de frecvență, dezechilibrarea sistemului trifazat de curenți etc.),

datorate unor consumuri necorespunzătoare (de exemplu: suprasarcini de putere activă sau reactivă, sarcini nesimetrice etc.), au repercusiuni negative şi asupra altor consumatori de energie electrică din sistemul energetic interconectat.

C. OBIECTIVELE MAJORE ALE ACTIVITĂŢILOR DIN SISTEMUL ENERGETIC

Caracteristicile energiei electrice impun lucrătorilor din sistemul energetic trei obiective de bază, şi anume:

— alimentarea continuă cu energie electrică, la parametrii nominali, a tuturor categoriilor de consumatori, şi în special a marilor platforme industriale;

— eliminarea acţiunilor greşite ale personalului;

— evitarea accidentelor de muncă.

Pentru a putea sesiza prezenţa energiei electrice, pentru a-i putea măsura parametrii şi în consecinţă pentru a o putea utiliza cît mai raţional, în avantajul reciproc al producătorului, furnizorului şi consumatorului, toţi cei care şi-au ales meseria de electrician trebuie să nu uite nici un moment particularităţile pe care le prezintă energia electrică şi obiectivele principale pe care le au de rezolvat.

D. CONDIŢII (INDICI) DE CALITATE A ENERGIEI ELECTRICE

Condiţiile de calitate a energiei electrice se caracterizează prin următorii indici de performanţă: continuitatea în alimentare cu energie electrică, la tensiune şi frecvenţă de valori cît mai constante.

Continuitatea reprezintă condiţia principală de calitate şi presupune lipsa întreruperilor în furnizarea energiei electrice necesare consumatorilor, indiferent dacă acestea sînt intempestive (în care caz se numesc incidente şi avarii) sau sînt voite (pentru racordarea unor instalaţii noi, revizii sau reparaţii planificate ale instalaţiilor existente).

Menţinerea la o valoare constantă (50 Hz) a frecvenţei curentului electric alternativ este un alt indice de calitate a energiei electrice. Este cunoscut faptul că frecvenţa industrială la care lucrează sistemul energetic şi pentru care sînt construite majoritatea instalaţiilor este de 50 Hz. Abateri în plus sau în minus de la această valoare pot avea influenţe negative atît asupra instalaţiilor, cît şi asupra consumatorilor. Astfel, la scăderea frecvenţei, turaţia motoarelor maşinilor-unelte se reduce, micşorîndu-se productivitatea muncii; mai mult decît atît, o scădere accentuată a frecvenţei (de exemplu, la 47 Hz) poate produce „desprinderea" (oprirea) unor motoare electrice (de exemplu, motoarele pompelor de alimentare ale cazanelor de abur), fapt care poate avea consecinţe grave asupra funcţionării sistemului energetic.

Menţinerea constantă a tensiunii de furnizare a energiei electrice este de asemenea un indice de calitate a energiei electrice. Abaterile tensiunii (ca valori absolute) de la valoarea nominală şi îndepărtarea ei de la forma de sinusoidă pot produce efecte negative. Astfel, o scădere a tensiunii sub valoa-

rea nominală produce pierderi suplimentare în instalaţii, supraîncărcări ale motoarelor maşinilor-unelte şi intensităţi luminoase mai reduse ale lămpilor electrice.

Calitatea lucrărilor executate în instalaţii, deşi nu reprezintă un indice direct de calitate a energiei electrice, poate avea influenţă (prin modul în care au fost concepute şi proiectate instalaţiile sau după cum au fost stabilite şi executate tehnologiile de reparaţii şi de întreţinere) asupra calităţii energiei electrice.

De exemplu, un contact electric executat prin presare sau prin lipire va prezenta o probabilitate mai mică să se transforme într-un contact slab decît unul prin strîngere cu şuruburi. De asemenea, o siguranţă greşit calibrată poate cauza întreruperea mai multor consumatori decît ar fi fost necesar. De fapt, calitatea lucrărilor executate în instalaţii influenţează calitatea energiei electrice prin indicele de performanţă reprezentat de continuitatea în alimentare.

E. CONTROLUL CALITĂŢII ENERGIEI ELECTRICE ŞI A LUCRĂRILOR EXECUTATE

Cunoscîndu-se particularităţile energiei electrice, importanţa ei, precum şi condiţiile de calitate care o definesc, rezultă în mod clar că urmărirea valorilor unor parametri din sistem devine o condiţie esenţială pentru buna funcţionare a sistemului energetic, pentru continuitatea în alimentarea cu energie electrică a consumatorilor.

Urmărirea acestor parametri nu poate fi însă efectuată decît printr-un control al acestora cu **instrumente de măsurare**, specifice energiei electrice. Ca urmare, este foarte important să se ştie **cînd, cum şi în ce condiţii** se utilizează instrumentele de măsurare şi cum funcţionează acestea.

REZUMAT

- *Particularităţile calitative ale energiei electrice* sînt:
  - — producerea, transformarea, distribuţia şi consumul sînt simultane;
  - — necesită aparate şi metode de măsurare specifice;
  - — depinde atît de producător cît şi de consumator.
- *Obiectivele activităţilor din sistemul energetic* sînt:
  - — alimentarea continuă cu energie electrică;
  - — eliminarea acţiunilor greşite în exploatare;
  - — evitarea accidentelor de muncă.

ÎNTREBĂRI RECAPITULATIVE

1. *Care sînt avantajele folosirii energiei electrice?*
2. *Care sînt particularităţile calitative ale energiei electrice prezentate într-o formă dezvoltată?*
3. *Care sînt indicii de calitate ai energiei electrice?*

CAPITOLUL 2

METODE ŞI MIJLOACE DE MĂSURARE

A. MĂSURAREA MĂRIMILOR FIZICE

Mărimile fizice reprezintă proprietăţile măsurabile ale corpurilor, proceselor sau stărilor fizice care au anumite dimensiuni. De exemplu, lungimea, masa, temperatura, timpul etc. reprezintă mărimi fizice, care au proprietatea esenţială de a putea creşte sau descreşte. Ele sînt de diferite specii, determinate prin procedeul lor de măsurare; toate mărimile ce se pot măsura prin acelaşi procedeu de măsurare fac parte din aceeaşi specie (sînt de aceeaşi natură).

A măsura o mărime printr-un anumit procedeu înseamnă a o compara cu o altă mărime de aceeaşi natură, luată convenţional ca unitate de măsură. Raportul dintre mărimea măsurată X şi unitatea de măsură x reprezintă un număr α, numit *valoarea mărimii fizice date*, adică:

$$\alpha = \frac{X}{x} \tag{2.1}$$

sau

$$X = \alpha x. \tag{2.2}$$

Mărimea şi unitatea ei de măsură reprezintă noţiuni fizice, cu aceeaşi dimensiune fizică; valoarea mărimii însă reprezintă un număr fără dimensiuni. Mărimea nu variază cu unitatea de măsură aleasă, în timp ce valoarea variază invers proporţional cu aceasta. De exemplu, valoarea unei mărimi poate fi 2, dacă unitatea de măsură este metrul, sau 200, dacă unitatea de măsură este centimetrul. De aici rezultă că, pentru ca valoarea unei mărimi fizice să fie univoc determinată, trebuie ca rezultatul măsurării efectuate cu un anumit procedeu de măsură să fie exprimat numai în raport cu o anumită unitate de măsură.

B. ELEMENTELE PROCESULUI DE MĂSURARE

În procesul de măsurare intervin următoarele elemente:

— mărimea fizică de măsurat sau obiectul măsurării;

— metoda sau procedeul de măsurare;

— mijlocul de măsurare.

1. MĂRIMILE FIZICE DE MĂSURAT

Mărimile fizice de măsurat se împart în două categorii: mărimi fundamentale și mărimi derivate.

Mărimile fundamentale sînt mărimi independente sau distincte, cu ajutorul cărora se definesc mărimile derivate. De exemplu, lungimea l, timpul t și masa m sînt trei specii de mărimi fundamentale folosite în mecanică. Temperatura reprezintă o mărime fundamentală folosită în termotehnică. Intensitatea luminoasă reprezintă o mărime fundamentală folosită în fotometrie, în timp ce intensitatea curentului electric reprezintă o mărime fundamentală în domeniul electricității.

Numărul mărimilor fundamentale este deci limitat.

Mărimile derivate se definesc astfel încît valorile lor rezultă din valorile (sau din creșterea valorilor) mărimilor fundamentale cunoscute, fără a se face un nou apel la experiență. Viteza, de exemplu, constituie o specie de mărime derivată, deoarece ea se definește cu ajutorul lungimilor l și al timpului t $\left(v = \frac{dl}{dt}\right)$, ale căror mărimi se presupun cunoscute. Introducerea mărimilor derivate în știință și tehnică ușurează descrierea stărilor și a fenomenelor. Într-un sistem fizic, numărul mărimilor derivate nu este limitativ.

2. METODELE DE MĂSURARE

Metodele sau procedeele de măsurare reprezintă operații reproductibile, efectuate în anumite condiții, cu ajutorul cărora se compară mărimile fizice de măsurat cu unitățile de măsură. Ele depind de mărimile de măsurat și de precizia dorită a măsurării, clasificîndu-se după mai multe criterii.

● După *modul de obținere a valorilor mărimilor de măsurat*, metodele de măsurare pot fi directe sau indirecte.

Metodele de măsurare directă sînt cele mai numeroase și constituie baza măsurării tuturor mărimilor fizice. Ele permit citirea directă a rezultatelor sau compararea directă cu unitatea de măsură a mărimii respective.

Metoda de citire determină mărimea de măsurat prin citirea directă a valorii acesteia pe scara gradată a unui aparat de măsurare. În acest caz, scara aparatului este gradată în unități ale mărimii de măsurat. De exemplu, măsurarea intensității curentului electric cu ajutorul ampermetrelor sau măsurarea tensiunii cu ajutorul voltmetrelor se fac prin citirea directă a valorii mărimilor respective, pe scara aparatului.

În general, aceste metode se aplică în toate cazurile în care nu este necesară o precizie mare a măsurărilor.

Metoda directă de comparație măsoară mărimea de măsurat prin compararea ei cu una sau cu mai multe mărimi. Această comparare se poate realiza prin trei metode: metoda de *zero*, metoda *diferențială* și metoda *de substituție:*

— *metoda de zero* se bazează pe faptul că efectul mărimii de măsurat este compensat (redus la zero) de efectul unei mărimi cunoscute de același fel. Compensarea sau echilibrarea efectului mărimii de măsurat cu cel al

mărimii cunoscute se manifestă prin dispariţia unei mărimi într-o porţiune a circuitului de măsurare. Aceasta se realizează cu ajutorul aparatelor de zero. De exemplu, măsurarea rezistenţelor electrice cu ajutorul punţilor poate fi făcută după echilibrarea lor, care are ca rezultat dispariţia curentului în diagonala în care este conectat un galvanometru (aparat de zero);

— *metoda diferenţială* determină valoarea mărimii de măsurat ca o diferenţă între efectele simultane exercitate asupra aparatului de măsurare de către mărimea de măsurat şi o mărime cunoscută cu care aceasta se compară;

— *metoda de substituţie* substituie, în montajul de măsurare, mărimea de măsurat cu o mărime cunoscută, urmărind să obţină acelaşi efect asupra aparatului de măsurare în ambele cazuri. Dacă cele două mărimi comparate produc aceleaşi efecte calitative şi cantitative, atunci ele sînt identice. De exemplu, la metodele de măsurare a curenţilor şi a tensiunilor prin metoda respectivă (de substituţie) se substituie tensiunea necunoscută de măsurat cu o tensiune electromotoare etalon (pilă Weston).

Metodele de măsurare indirectă sînt acelea în care se măsoară întîi alte mărimi, din care mărimea căutată se determină ulterior, prin calcule. De exemplu, metoda industrială de măsurare a rezistenţelor determină valoarea mărimii de măsurat din raportul dintre tensiune şi curent, ale căror valori sînt citite direct pe un voltmetru şi pe un ampermetru.

Uneori, pentru determinarea valorilor unor mărimi se utilizează combinat atît metode directe, cît şi metode indirecte.

● După *caracterul măsurării în timp a mărimilor de măsurat*, metodele de măsurare pot fi continue şi discontinue (discrete).

Măsurările continue se efectuează continuu în timp, în fiecare moment obţinîndu-se o anumită valoare a mărimii măsurate.

Măsurările discrete se efectuează numai la anumite intervale de timp.

● După *precizia urmărită în măsurare*, metodele sînt: de laborator şi tehnice sau industriale.

Metodele de laborator se efectuează cu mijloace de măsurare de mare precizie, în timp ce *metodele industriale* folosesc şi mijloace de măsurare cu precizie mai mică, admisibilă scopului urmărit.

3. MIJLOACELE DE MĂSURARE

Mijloacele de măsurare determină cantitativ mărimile de măsurat cu ajutorul unor aparate de măsurare.

Aparatele de măsurare efectuează măsurările cu ajutorul cărora se realizează compararea directă sau indirectă a mărimii de măsurat cu unitatea de măsură. Alegerea acestora din urmă depinde de metoda de măsurare utilizată.

Unele mijloace de măsurare, care poartă denumirea de *etaloane*, servesc la păstrarea şi la reproducerea unităţilor de măsură, cu precizia metrologică valabilă într-un anumit stadiu al tehnicii măsurării. Celelalte mijloace de măsurare servesc la măsurări curente şi poartă denumirea de *mijloace de măsurare de lucru*, care pot fi *de laborator* sau *industriale (tehnice)*.

C. SISTEME DE UNITĂŢI DE MĂSURĂ

Măsurarea mărimilor fizice presupune totdeauna alegerea prealabilă a unor unităţi de măsură care reprezintă mărimi alese convenţional dintr-un număr de mărimi de acelaşi fel. Dimensiunea unităţii poate fi aleasă oricare, însă o dată acceptată ea trebuie să rămînă neschimbată.

Corespunzător mărimilor măsurate, unităţile de măsură se împart, după natura acestora, în *unităţi fundamentale* şi *unităţi derivate*. Totalitatea unităţilor fundamentale şi derivate folosite într-un anumit domeniu de măsurare se numeşte *sistem de unităţi*. Fiecare sistem de unităţi de măsură are la bază un anumit număr de unităţi fundamentale, independente între ele.

Sistemul de unităţi de măsură adoptat în ţara noastră este sistemul internaţional (S.I.), care a fost stabilit la cea de-a IX-a Conferinţă Generală de Măsuri şi Greutăţi de la Paris din anul 1960, cu acceptarea următoarelor unităţi fundamentale:

— pentru lungime, metrul	simbol m
— pentru masă, kilogramul	simbol kg
— pentru timp, secunda	simbol s
— pentru intensitatea curentului electric, amperul	simbol A
— pentru temperatură, gradul Kelvin	simbol K
— pentru intensitatea luminoasă, candela	simbol cd

În acest sistem internaţional (S.I.), amperul reprezintă singura unitate electrică fundamentală. Toate celelalte mărimi electrice şi magnetice se definesc în raport cu această unitate fundamentală şi cu cele trei unităţi mecanice fundamentale: metrul, kilogramul şi secunda.

Definiţia amperului ca unitate fundamentală, adoptată pe baza interacţiunii mecanice dintre doi curenţi la cea de-a IX-a Conferinţă Generală de Măsuri şi Greutăti din anul 1948, are următoarea formulare: „**Amperul** este *intensitatea unui curent electric constant, care menţinut în două conductoare paralele, rectilinii, de lungime infinită şi de secţiune circulară neglijabilă, aşezate în vid la o distanţă de un metru unul de altul, produce între aceste două conductoare o forţă egală cu* $2 \cdot 10^{-7}$ $N \cdot m^{-1}$ *(newtoni pe metru de lungime)*". Această definiţie a rezultat ca urmare a faptului că, în prezent, se poate măsura cu mare precizie forţa dintre două conductoare paralele parcurse de curent.

Pe lîngă acest sistem, o perioadă de timp s-au folosit sistemul CGS, în domeniul fizicii, şi sistemul tehnic, Mkgfs, în industrie, care erau bazate pe trei unităţi fundamentale, şi anume: centimetrul — pentru lungime, gramul — pentru masă şi secunda — pentru timp, în sistemul CGS, şi metrul — pentru lungime, kilogramulforţă — pentru forţă şi secunda — pentru timp, în sistemul Mkgfs. În acelaşi timp, numai pentru domeniile mecanicii, ale electricităţii şi magnetismului s-a folosit sistemul practic MKSA, în care a apărut amperul ca fiind a patra unitate fundamentală.

D. ERORI DE MĂSURARE

1. DEFINIŢII FUNDAMENTALE ÎN STUDIUL ERORILOR DE MĂSURARE

Măsurările efectuate asupra mărimilor fizice, oricît de precise ar fi, conţin totdeauna erori de măsurare, care se datoresc atît mijlocului şi metodei de măsurare, cît şi experimentatorului şi condiţiilor în care se experimentează. În cele ce urmează se vor defini eroarea de măsurare şi eroarea admisibilă a unei măsurări.

Eroarea de măsurare reprezintă diferenţa dintre valoarea X a unei mărimi rezultate printr-o măsurare oarecare şi o valoare de referinţă X_0, care poate fi, fie valoarea reală a acestei mărimi (ce s-ar obţine printr-o măsurare riguros exactă a ei), fie valoarea efectivă cea mai apropiată de aceasta, obţinută prin mijloace de măsură-etalon, fie valoarea medie rezultată dintr-un şir de măsurări. Ea se poate exprima sub formă de *eroare absolută* şi este dată de relaţia:

$$\Delta X = X - X_0 \qquad (2.5)$$

sau sub formă de *eroare relativă*, care este raportul dintre eroarea absolută ΔX şi valoarea de referinţă a mărimii măsurate, adică:

$$\Delta X_r = \frac{\Delta X}{X_0} = \frac{X - X_0}{X_0}. \qquad (2.6)$$

Relaţiile (2.5) şi (2.6) arată că eroarea absolută este de aceeaşi natură ca şi mărimea de măsurat, şi deci se exprimă în aceleaşi unităţi de măsură, în timp ce eroarea relativă reprezintă un număr (fără dimensiuni) exprimat de obicei în procente.

Eroarea admisibilă sau *eroarea tolerată* reprezintă valoarea absolută a erorii maxime admise de prevederile unui standard, ale unei instrucţiuni de verificare sau ale unei norme de încercare, pentru rezultatul unei măsurări sau pentru indicaţiile unui mijloc de măsurare. Pentru măsurări, eroarea tolerată se dă fie sub forma unei erori absolute, fie sub forma unei erori relative; pentru aparatele de măsurare se dă, mai ales, sub forma unei erori relative procentuale, calculată faţă de limita superioară de măsurare a aparatului, care defineşte *clasa de precizie* a acestuia. *Clasa de precizie* constituie o caracteristică a aparatelor electrice de măsurare, după care se face clasificarea lor din punctul de vedere al preciziei şi se exprimă printr-un număr C, înscris pe cadranul fiecărui aparat.

Clasa de precizie a unui aparat se exprimă matematic sub forma:

$$C = \frac{\Delta i_{ad}}{X_m} 100\%, \qquad (2.7)$$

în care:

Δi_{ad} este eroarea admisibilă de indicaţie a aparatului*;
X_m — limita superioară de măsurare.

---

* Eroarea relativă de indicaţie a unui aparat $\frac{\Delta i}{X_0} = \frac{X_i - X_0}{X_0}$ este diferită de indicele de clasă al acestuia prin aceea că raportarea se face la o mărime oarecare X_0 măsurată cu aparatul-etalon. Cînd X_0 reprezintă limita superioară de măsurare X_m, evident că ele coincip.

Din această relație rezultă că eroarea de măsurare admisă pentru un aparat, exprimată în unitățile scrise pe scara sa, are valoarea maximă admisibilă:

$$\Delta i_{ad} = \frac{c}{100} X_m, \tag{2.8}$$

pentru orice punct de pe scara gradată a aparatului de măsurare.

De exemplu, pentru un ampermetru de clasă de precizie 0,2 și limita superioară de măsurare $X_m = 5$ A, eroarea maximă admisibilă de indicație este:

$$i_{ad} = \frac{0{,}2}{100} \cdot 5 = 0{,}01 \text{ A}.$$

2. CLASIFICAREA ERORILOR DE MĂSURARE

Erorile de măsurare se pot clasifica convențional, după caracterul lor, în erori *sistematice*, erori *aleatorii* (întîmplătoare) și erori *grosolane (greșeli)*.

● **Erorile sistematice** capătă în fiecare caz o valoare determinată, constantă sau variabilă după o anumită lege.

Eroarea constantă are același semn în tot cursul măsurării.

De exemplu, cu o riglă gradată în mm, la care prima diviziune este de 0,8 mm, celelalte diviziuni fiind corecte, se face o eroare sistematică de −0,2 mm.

Eroarea variabilă poate lua în cursul măsurării diferite valori, schimbîndu-și eventual și semnul. După caracterul ei, ea poate fi progresivă sau periodică. Eroarea progresivă poate crește sau descrește continuu în cursul măsurării (de exemplu, cazul unui șubler în care fiecare diviziune este mai mare sau mai mică decît 1 mm). Eroarea periodică își poate modifica valoarea și semnul (de exemplu, eroarea unui comparator cu cadran, la care axul acului indicator nu este situat în centrul cadranului, ci puțin excentric).

● După *proveniența lor*, erorile sistematice pot fi *instrumentale*, *de instalare*, *personale* și *de metodă*.

Eroarea instrumentală este cauzată de imperfecțiunea constructivă a aparatului folosit pentru măsurare. De exemplu, gradarea sau montarea greșită a scării, precum și reglajul insuficient de precis al dispozitivului de măsurare a aparatului conduc la o coincidență imperfectă a indicațiilor scării gradate cu valorile efective ale mărimii de măsurat.

Eroarea de instalare este o eroare sistematică provocată de instalarea sau de așezarea greșită a aparatului de măsurare folosit ori de modificarea condițiilor exterioare (presiune, umiditate, temperatură, cîmp magnetic, cîmp electric etc.). De exemplu, montarea aparatelor fără verificarea orizontalității sau a verticalității lor determină erori sistematice de instalare.

Eroarea personală apare ca urmare a particularităților senzoriale proprii ale observatorului (experimentatorului).

Eroarea de metodă se datorește metodei de măsurare fie prin cunoașterea insuficientă a acesteia sau a condițiilor în care se efectuează măsurarea, fie prin aplicarea ei incorectă.

● **Erorile aleatorii (întîmplătoare)** capătă valori și semne întîmplătoare, într-un șir de determinări succesive ale aceleiași mărimi, efectuate în aceleași condiții. Ele nu sînt controlabile, fiind produse de fluctuațiile incidentale ale aparatelor de măsură, ale mediului ambiant și ale atenției observatorului.

Pentru a se determina influența acestor erori asupra rezultatului final al măsurării, se măsoară mărimea de un număr suficient de ori, în condiții identice, și apoi se calculează media aritmetică a rezultatelor obținute, care — după ce s-a scăzut eroarea sistematică — este considerată ca valoare efectivă a mărimii măsurate.

● **Erorile grosolane (greșelile)** au valori foarte mari și duc la denaturarea rezultatelor măsurărilor. Ele apar rar și provin dintr-o manipulare greșită a experimentatorului, din citirea ori din scrierea greșită a rezultatelor sau din alegerea necorespunzătoare a metodei de experimentare. Rezultatele denaturate datorite greșelilor nu se iau în considerare, trebuind repetate măsurările.

3. CALCULUL ERORILOR DE MĂSURARE

Pentru aflarea valorilor mărimilor de măsurat cît mai apropiate de valorile lor reale, după efectuarea măsurărilor se face corectarea rezultatelor obținute, calculîndu-se în acest scop erorile. Calculul erorilor diferă în funcție de metoda de măsurare folosită.

În cazul măsurărilor directe asupra unei mărimi, eroarea relativă maximă se determină fără dificultate cu ajutorul relației (2.6).

În măsurările indirecte, obișnuite, mărimea de măsurat X este legată de mărimile măsurate direct (u, v, w), printr-o relație de forma:

$$X = \mathrm{F}(u, v, w). \qquad (2.9)$$

Gradul de precizie al măsurării este definit de eroarea relativă maximă posibilă $\pm \frac{\Delta X}{X}$, care se exprimă în funcție de erorile relative parțiale $\pm \frac{\Delta u}{u}$, $\pm \frac{\Delta v}{v}$ $\pm \frac{\Delta w}{w}$ etc., ale mărimilor măsurate în mod direct. Obișnuit, erorile relative parțiale se cunosc numai ca mărime, nu și ca semn. Datorită acestui fapt, pentru a se lua în considerație cazul cel mai defavorabil, căruia îi corespunde eroarea relativă maximă, se vor considera arbitrar toate erorile în același sens, și anume pozitiv. Erorile respective reprezintă variații finite, foarte mici, ale variabilelor, cărora le corespund variații finite și foarte mici ale mărimii de măsurat, presupusă continuă în domeniul de măsurare. Determinarea erorilor, în acest caz, se bazează pe formarea diferenței finite — *diferențiere simplă* — sau pe formarea diferențialei — *diferențiere logaritmică* — a funcției.

Metoda de diferențiere simplă se aplică în felul următor:

Fie X mărimea de măsurat reprezentată de exemplu de o relație de forma:

$$X = u + v + w, \qquad (2.10)$$

în care u, v, w reprezintă mărimile măsurate direct.

Ţinîndu-se seamă de eroarea de măsurare a mărimii de măsurat şi de erorile corespunzătoare ale mărimilor u, v, w, rezultă relaţia:

$$X + \Delta X = (u + \Delta u) + (v + \Delta v) + (w + \Delta w). \tag{2.11}$$

Dacă se scade relaţia (2.10) din relaţia (2.11) se obţine:

$$(X + \Delta X) - X = (u + \Delta u) + (v + \Delta v) + (w + \Delta w) - (u + v + w) \tag{2.12}$$

sau

$$\Delta X = \Delta u + \Delta v + \Delta w, \tag{2.13}$$

adică eroarea de măsurare a mărimii de măsurat indirect este egală cu suma erorilor de măsurare a mărimilor măsurate direct.

Eroarea relativă corespunzătoare se determină prin aplicarea relaţiei generale (2.6), obţinîndu-se:

$$\Delta X_r = \frac{\Delta X}{X} = \frac{\Delta u + \Delta v + \Delta w}{u + v + w}. \tag{2.14}$$

Metoda de diferenţiere logaritmică permite calculul erorii relative maxime posibile, plecînd de la definirea mărimii de măsurat cu ajutorul unei relaţii generale de forma:

$$X = \frac{u^m \cdot v^n}{w^p}, \tag{2.15}$$

în care m, n şi p sînt exponenţii valorilor măsurate direct, care pot fi întregi sau fracţionari, pozitivi sau negativi.

Dacă se logaritmează relaţia (2.15) şi apoi se diferenţiază, se obţine:

$$\ln X = m \ln u + n \ln v - p \ln w \tag{2.16}$$

şi

$$\frac{dX}{X} = m\frac{du}{u} + n\frac{dv}{v} - p\frac{dw}{w}. \tag{2.17}$$

Înlocuindu-se derivatele* dX, du, dv şi dw prin creşterile finite ale mărimilor corespunzătoare, relaţia (2.17) devine:

$$\frac{\Delta X}{X} = m\frac{\Delta u}{u} + n\frac{\Delta v}{v} - p\frac{\Delta w}{w}. \tag{2.18}$$

în care $\frac{\Delta X}{X}$, $\frac{\Delta u}{u}$, $\frac{\Delta v}{v}$ şi $\frac{\Delta w}{w}$ se pot considera ca fiind erorile relative ale mărimilor X, u, v şi w.

Dacă se consideră aceste erori cu acelaşi semn, se poate afla eroarea relativă maximă posibilă a mărimii determinate indirect, adică:

$$\left[\frac{\Delta X}{X}\right]_{max} = m \cdot \frac{\Delta u}{u} + n\frac{\Delta v}{v} + p\frac{\Delta w}{w} \tag{2.19}$$

sau

$$[\Delta X_r]_{max} = m\Delta u_r + n\Delta v_r + p\Delta w_r. \tag{2.20}$$

* Derivatele nu reprezintă altceva decît limita creşterilor finite ale mărimilor respective.

În măsurările indirecte, efectuate prin comparație, nu se obține valoarea mărimii măsurate, ci numai diferența față de o măsurare etalon (măsurare model), folosindu-se un instrument de măsurare perfect.

REZUMAT

- *Mărimile fizice* reprezintă proprietățile măsurabile ale materiei sau energiei și se împart în două categorii:
  - mărimi fundamentale (de exemplu: lungimea, timpul, masa și intensitatea curentului);
  - mărimi derivate, care sînt obținute din cele fundamentale (de exemplu: viteza derivă din raportul dintre lungime și timp).
- *Metodele* sau *procedeele de măsurare* reprezintă aparate cu ajutorul cărora mărimile fizice sînt comparate cu unitățile de măsură.
- *Unitățile de măsură* sînt stabilite pe baza unui sistem internațional unanim acceptat; de exemplu: *metrul* (lungime), *kilogramul* (masa), *secunda* (timpul), *amperul* (intensitatea curentului) etc.

ÎNTREBĂRI RECAPITULATIVE

1. *Ce sînt mărimile fizice și cum se clasifică ele în tehnică?*
2. *Valoarea unei mărimi oarecare depinde sau nu de sistemul de unități adoptat și de ce?*
3. *Poate fi definită o mărime fundamentală în raport cu alte mărimi fundamentale și de ce?*
4. *Poate fi definită o mărime derivată în raport cu alte mărimi derivate și de ce?*
5. *Erorile de măsurare depind de sistemul de unități adoptat?*

C A P I T O L U L 3

APARATE ELECTRICE DE MĂSURARE

A. CLASIFICAREA APARATELOR ELECTRICE DE MĂSURARE

Aparatele electrice de măsurare se pot clasifica după următoarele criterii: principiul de funcţionare, mărimea măsurată, felul curentului, clasa de precizie, modul de utilizare şi modul în care se înscriu şi se citesc indicaţiile lor.

● După *principiul de funcţionare*, se deosebesc următoarele tipuri de aparate electrice de măsurare: magnetoelectrice, electromagnetice, electrodinamice, de inducţie, termice, de vibraţie, electrostatice şi electronice.

● După *mărimea măsurată*, aparatele electrice de măsurare pot fi: ampermetre, voltmetre, wattmetre şi varmetre, contoare de energie, frecvenţmetre, cosfimetre etc.

● După *felul curentului*, aparatele electrice de măsurare pot fi: pentru curent continuu şi pentru curent alternativ.

● După *clasa de precizie*, se deosebesc aparate cu clase de precizie de 0,1, 0,2, 0,5, 1, 1,5, 2,5, 5. Aparatele cu clasele de precizie 0,1—0,5 sînt aparate de laborator, iar celelalte sînt folosite, în general, ca aparate tehnice pentru măsurări industriale sau ca aparate de panou.

● După *modul de utilizare şi de exploatare*, aparatele electrice de măsurare pot fi fixe (aparate de panou) şi portabile.

● După *modul în care se înscriu şi se citesc indicaţiile lor*, aparatele electrice de măsurare pot fi: *aparate indicatoare*, care sînt echipate în general cu dispozitive de citire cu scări gradate şi cu ace indicatoare sau spoturi luminoase*; *aparate totalizatoare* sau *integratoare*, care însumează valorile luate într-un anumit timp de mărimea ce se măsoară, rezultatul însumării fiind citit pe un cadran (de exemplu, contoarele de energie); *aparate înregistratoare*, care înregistrează pe o diagramă vizibilă variaţia în timp a valorilor mărimii de măsurat.

În cadrul acestui capitol, aparatele vor fi descrise pe baza primului criteriu de clasificare.

---

* În ultimul timp au început să fie realizate aparate de măsurare numerice (cifrice) la care mărimea de măsurat este afişată pe un cadran în sistem „alfanumeric" (cu cifre) folosind elemente electronice.

B. PRINCIPII DE MĂSURARE A MĂRIMILOR CU APARATELE ELECTRICE

Indiferent de principiul de funcţionare, măsurarea mărimilor cu ajutorul aparatelor electrice se bazează pe acelaşi fenomen, şi anume pe existenţa cuplurilor antagoniste.

Într-adevăr, dispozitivele de măsurare au proprietatea generală a corpurilor mobile care, situate într-un cîmp electromagnetic sau electrostatic, tind să se orienteze astfel, încît energia sistemului să fie cît mai mare.

Această tendinţă de creştere a energiei provoacă cuplul activ, care acţionează asupra echipajelor mobile producînd deviaţii ale acestora. Pe baza acestui fenomen rezultă că expresia generală a cuplurilor active este determinată de raportul dintre variaţia energiei magnetice W_m şi a deviaţiei α a sistemului mobil, adică:

$$M_a = \frac{dW_m}{d\alpha}. \tag{3.1}$$

În expresia (3.1), deviaţia α a sistemului mobil este luată ca variabilă independentă, iar valoarea energiei cîmpului (magnetic sau electric) depinde de valoarea mărimii de măsurat. Dacă se notează această mărime cu K, atunci fiecărei valori a mărimii de măsurat îi corespunde, pentru aparatul dat, o valoare a cuplului activ, adică:

$$M_a = f(\alpha). \tag{3.2}$$

Dacă sistemul mobil s-ar afla numai sub influenţa acestui cuplu, atunci la orice valoare a mărimii de măsurat sistemul s-ar roti continuu sau pînă cînd ar fi împiedicat de o cauză oarecare (un dispozitiv de oprire, frecare în piesele mecanismului etc.).

Pentru ca deplasarea să fie proporţională cu valoarea mărimii de măsurat, în aparatele de măsurare se introduc dispozitive antagoniste care dau naştere unui sistem de cupluri, a căror rezultantă, numită cuplu rezistent M_r, se opune cuplului activ. Acest cuplu rezistent, proporţional cu deviaţia α, are expresia generală:

$$M_r = D\alpha, \tag{3.3}$$

în care D reprezintă o constantă de proporţionalitate.

Sub acţiunea acestor cupluri, echipajul mobil se va roti pînă în momentul în care ele se vor echilibra, oprindu-se într-o poziţie corespunzătoare mărimii măsurate. În acest caz se poate scrie:

$$M_a = M_r$$

sau

$$f(x) - D\alpha = 0, \tag{3.4}$$

de unde:

$$\alpha = \frac{1}{D} f(x), \tag{3.5}$$

adică deviaţia staţionară a echipajului mobil este funcţie de mărimea de măsurat şi de constanta D a aparatului.

C. ELEMENTE DE CONSTRUCŢIE ALE APARATELOR ELECTRICE DE MĂSURARE

Aparatele electrice de măsurare au ca părţi constructive dispozitivul de măsurare (care defineşte tipul aparatului) şi elementele accesorii necesare pentru o mai bună adaptare la scopul urmărit.

1. DISPOZITIVUL DE MĂSURARE

Acest dispozitiv este format dintr-un ansamblu de elemente din a căror interacţiune apar forţe mecanice care determină mişcarea echipajului mobil.

Constructiv, acest dispozitiv diferă de la un tip de aparat la altul, însă în toate cazurile el are o parte fixă şi una mobilă. În afara acestor părţi, dispozitivul de măsurat mai conţine o serie de elemente auxiliare, cum ar fi: dispozitivul antagonist, dispozitivul de citire a indicaţiilor (indicator, totalizator, înregistrator) şi dispozitivul de amortizare sau de frînare.

Partea fixă sau **statorul** dispozitivului de măsurare produce cîmpul magnetic sau electric care provoacă mişcarea echipajului mobil. Acesta poate fi: un magnet permanent — la aparatele magnetoelectrice; una sau mai multe bobine — la aparatele electromagnetice de atracţie sau o piesă de fier magnetizată de o bobină — la cele de respingere; una sau mai multe bobine fără miez de fier — la aparatele electrodinamice şi cu miez de fier — la aparatele ferodinamice; un sistem de electromagneţi — la aparatele de inducţie; un sistem de plăci conductoare (armături de condensator) — la aparatele electrostatice; un sistem de conductoare — la aparatele termice cu fir cald etc.

Partea mobilă sau **echipajul mobil** produce un cîmp de aceeaşi natură ca şi al părţii fixe, cu care interacţionează şi dă naştere la forţe mecanice sau cupluri. Această parte poate fi formată din: o bobină mobilă, care constituie, în general, un cadru — la aparatele magnetoelectrice sau ferodinamice (la aparatele magnetoelectrice, se introduc în interiorul cadrului mobil un cilindru fix de fier moale, pentru a le mări sensibilitatea), o bucată de fier moale, turtită şi cît se poate de uşoară — la aparatele electromagnetice, pîrghii mobile — la aparatele cu fir cald, un cilindru sau un disc dintr-un material nemagnetic — la aparatele de inducţie, plăci metalice — la aparatele electrostatice şi feromagnetice etc.

Echipajul mobil este suspendat pe benzi tensionate sau pe fire de torsiune, ca în figura 3.1, sau este fixat pe un ax, sprijinit în lagăre speciale, ca în figura 3.2, prevăzute cu pietre dure pentru reducerea frecărilor.

Primul tip de suspensie este utilizat la aparatele electrice de măsurare de mare sensibilitate, iar al doilea — la aparatele de tablou.

Dispozitivul antagonist sau **de producere a cuplului rezistent** echilibrează cuplul mecanic care apare între elementele active ale dispozitivului de măsurare. El poate fi creat în trei moduri, şi anume: mecanic, electric sau magnetic.

În primul caz (v. fig. 3.2), cel mai des întîlnit, dispozitivul antagonist este format dintr-un (sau mai multe) resort spiral metalic *1*, fixat cu un capăt de axul mobil, iar cu celălalt capăt, de o piesă curbă *2* ce poate fi rotită prin şurubul excentric *3*, numit *corector* al poziţiei de zero a dispozitivului indicator. La unele aparate, resorturile elastice, în afară de aducerea echi-

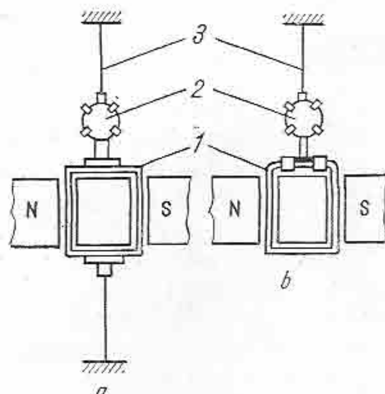


Fig. 3.1. Echipaje mobile:

a — cu benzi tensionate; *b* — cu fir de torsiune; *1* — cadru; *2* — oglindă; *3* — bandă sau fir de torsiune.

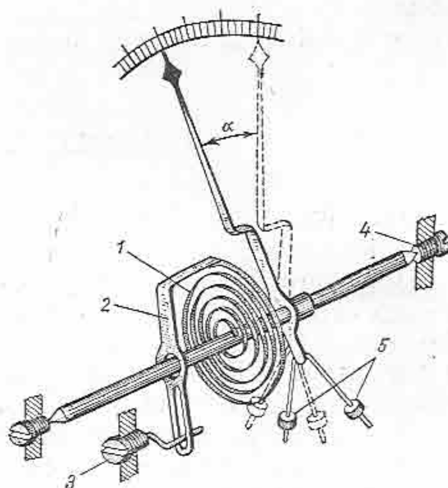


Fig. 3.2. Echipaj mobil sprijinit în lagăre:

1 — resort spiral; *2* — piesă de antrenare a corectorului; *3* — şurub excentric (corector); *4* — lagăr; *5* — contragreutăţi.

pajului mobil la zero după efectuarea măsurării, servesc şi la conducerea curentului electric către cadrul mobil.

În al doilea caz, dispozitivul antagonist este format dintr-o bobină încrucişată cu bobina mobilă, sub un anumit unghi şi fixată pe acelaşi ax. Asupra acestui sistem mobil de două bobine acţionează cupluri de sensuri contrare, care se echilibrează reciproc. Aparatele cu astfel de dispozitive antagoniste se numesc *logometre*.

În al treilea caz, dispozitivul antagonist foloseşte interacţiunea dintre curenţii induşi de un magnet permanent într-un disc de aluminiu, care se roteşte între polii săi şi cîmpul magnetului.

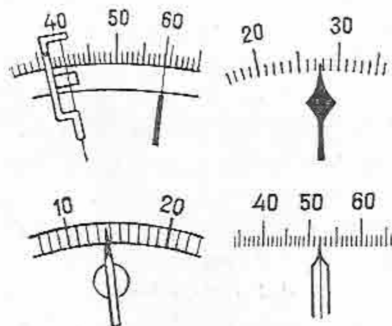


Fig. 3.3. Forme ale capului acului indicator.

Dispozitivul de citire a indicaţiilor este format în general dintr-un ac indicator care se deplasează în faţa unui cadran cu scară gradată. Acul indicator este solidar cu echipajul mobil al aparatului şi are diferite forme după tipul şi utilizarea aparatului de măsurare; el este subţire la aparatele de laborator şi gros la aparatele de tablou. Unele dintre formele pe care le poate avea capul acului indicator sînt reprezentate în figura 3.3.

La aparatele de măsurare de mare precizie, paralel cu scara gradată şi pe toată lungimea acesteia, se află o oglindă îngustă în care se observă imaginea acului indicator. În momentul citirii indicaţiilor aparatului este necesar să se privească scara gradată astfel încît acul indicator să se suprapună peste imaginea sa din oglindă. În acest mod se elimină eroarea „de

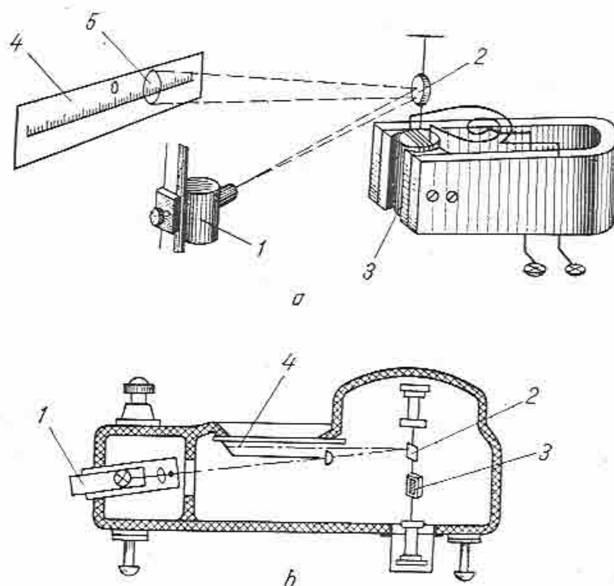


Fig. 3.4. Dispozitive de citire a indicatorilor cu oglindă:

a — cu sursă luminoasă exterioară; *b* — cu sursă luminoasă interioară; *1* — sursă luminoasă; *2* — oglindă; *3* — echipajul mobil; *4* — ecran gradat; *5* — spot luminos.

paralaxă" care ar putea să apară datorită faptului că, în lipsa oglinzii respective, experimentatorul nu priveşte perpendicular pe scara aparatului.

La unele aparate de laborator, de mare sensibilitate, acul indicator se înlocuieşte cu o mică oglindă pe care sînt trimise raze de lumină de la o sursă aflată în interiorul sau în afara aparatului. Simultan cu rotirea echipajului mobil al aparatului se roteşte şi oglinda, care deviază razele de lumină pe un ecran gradat, la aparatele cu sursă luminoasă exterioară, ca în figura 3.4, *a*, sau pe o scară gradată, la aparatele cu sursă luminoasă interioară, ca în figura 3.4, *b*.

Scara gradată a unui aparat de măsurare este trasată pe un cadran pe care se mai află şi alte date care precizează caracteristicile aparatului, şi anume: principiul de funcţionare, felul curentului pentru care este construit, clasa de precizie, unitatea de măsură a mărimii ce se măsoară, tensiunea la care a fost încercată izolaţia aparatului, indicaţii asupra rezistenţei sale interioare, a poziţiei de lucru, inscripţia fabricii constructoare, anul fabricaţiei etc.

Simboluri pentru aparatele electrice de măsurat

Simboluri pentru felul curentului			
Curent continuu	—	Curent alternativ trifazat pentru aparate cu un singur dispozitiv de măsurare	≋
Curent alternativ monofazat	~	Curent alternativ trifazat pentru aparate cu două dispozitive de măsurare	≋
Curent continuu și curent alternativ monofazat	≂	Curent alternativ trifazat pentru aparate cu trei dispozitive de măsurare	≋
Simboluri pentru tensiunea de încercare dielectrică			
Tensiunea de încercare de 500 V	☆	Nu se pretinde încercarea dielectrică	☆ 0
Tensiunea de încercare de peste 500 V (de exemplu, 2 kV)	☆ 2	Prevenirea împotriva tensiunii înalte care depășește tensiunea de încercare dielectrică	ϟ
Simboluri pentru poziția normală de funcționare și clasa de precizie			
Cu cadranul vertical	⊥	Cu cadranul înclinat față de orizontală cu 60° (înclinarea poate fi oarecare)	∠ 60°
Cu cadranul orizontal	⊓	Clasa se referă la erorile exprimate în procente din valoarea exactă (de exemplu, 1,5)	(1,5)
Simboluri care indică principiul de funcționare a aparatelor de măsurare (inclusiv accesoriile lor)			
Aparat magnetoelectric cu cadru mobil		Aparat feromagnetic (cu fier mobil, electromagnetic)	
Logometru magnetoelectric		Aparat cu fier mobil și magnet	
Aparat cu magnet mobil		Logometru feromagnetic	
Logometru cu magnet mobil		Aparat electrodinamic	

Simboluri care indică principiul de funcţionare a aparatelor de măsurare (inclusiv accesoriile lor)			
Aparat ferodinamic		Rezistenţă adiţională	R
Logometru electrodinamic		Inductanţă adiţională	L
Logometru ferodinamic		Impedanţă adiţională	Z
Aparat de inducţie		Ecranare electrostatică	
Logometru de inducţie		Ecranare magnetică	
Aparat termic (cu fir cald sau cu dilatare)		Aparat astatic	ast
Aparat magnetoelectric cu termocuplul inclus în aparat		Gradul de protecţie împotriva cîmpului magnetic	m
Aparat magnetoelectric cu redresor inclus în aparat		Bornă de pămînt	
Şunt pentru aparate de măsurat		Reglajul zero	
Referinţă la un document ataşat aparatului		Aparat cu lame vibrante	
Gradul de protecţie împotriva cîmpului electric		Orientare faţă de meridianul magnetic	
Aparat bimetalic		Standardul căruia îi corespunde produsul	STAS 4640-61
Aparat electrostatic		Frecvenţa 50 Hz	50 Hz

În figura 3.5 este reprezentat cadranul unui aparat pentru măsurarea puterii (wattmetru), cu scară gradată și inscripțiile necesare.

Gradarea scărilor poate fi făcută uniform sau neuniform, după cum intervalele dintre diviziuni sînt egale sau nu între ele. Cadranele au, de obicei, scara gradată corespunzător unghiului maxim de deviație a echipajului mobil, care în general* este de 90°.

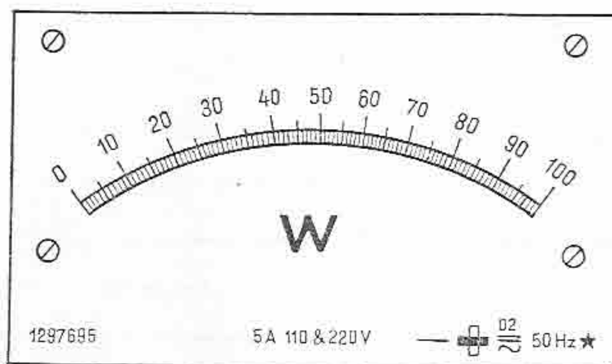


Fig. 3.5. Cadranul unui wattmetru.

Semnificația unor inscripții indicate pe cadran este notată prin simboluri caracteristice reproduse în tabelul 3.1.

Mărimea de măsurat se indică prin simbolul unității de măsură: V (volți), A (amperi), W (wați), kW (kilowați), cos φ (factorul de putere), Hz (frecvența) etc., iar tensiunea la care a fost încercat aparatul printr-o steluță colorată diferit (la aparatele mai vechi) sau printr-o steluță cu un număr interior (la aparatele mai noi). Corespondența dintre culoarea steluței și tensiunea de încercare este arătată în tabelul 3.2.

TABELUL 3.2

Corespondența dintre culoarea steluței și tensiunea de încercare

Culoarea steluței	Tensiunea de încercare, V
Neagră	500
Cafenie	1 000
Roșie	2 000
Albastră	3 000
Verde	5 000

Cînd steluțele nu sînt colorate, ci cuprind în interior un număr, acesta reprezintă tensiunea de încercare, în kV, a aparatului. Dacă steluța nu are nici un număr, atunci tensiunea de încercare este de 500 V.

Clasa de precizie a aparatului se indică pe cadran printr-un număr zecimal sau întreg, ca, de exemplu: 0,1, 0,2, 1, 3, 5. Dacă un aparat are in-

* În scopul micșorării erorii de citire, la unele aparate moderne, scara gradată se poate extinde pînă la unghiuri de 270°.

dicat pe cadran cifra 1, aceasta înseamnă că el face parte din aparatele cu clasa de precizie 1 și măsurările lui trebuie să nu dea o eroare mai mare decît 1% din deviația maximă a acului indicator (de exemplu, pentru o deviație maximă de 50 A, eroarea cu care poate fi indicată citirea este cel mult ±0,5 A).

Dispozitivul de amortizare sau de frînare reduce durata oscilațiilor acului indicator, în jurul valorii mărimii măsurate, și face ca indicatorul să se

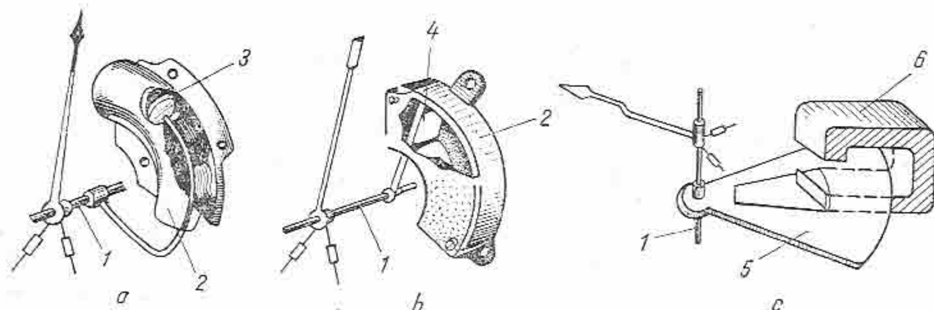


Fig. 3.6. Dispozitive de amortizare:
a — cu piston; b — cu paletă; c — magnetică.

așeze rapid în poziția corespunzătoare acestei valori. Constructiv, aceste dispozitive de amortizare pot fi cu aer sau cu magnet.

Dispozitivul de amortizare cu aer este alcătuit dintr-un tub *2*, închis la capete, în care se deplasează un piston *3*, ca în figura 3.6, *a*, sau o paletă *4*, ca în figura 3.6, *b*, solidare cu axul *1* al echipajului mobil. Prin comprimarea aerului sau prin rezistența care se opune la mișcarea paletei, mișcările oscilatorii ale echipajului mobil sînt amortizate.

Dispozitivul de amortizare magnetic (fig. 3.6, *c*) este alcătuit dintr-un disc (sau numai dintr-un sector de disc) *5*, construit dintr-un material nemagnetic, fixat pe axul *1* al echipajului mobil și care se rotește între polii unui magnet permanent *6*. Datorită acțiunii dintre curenții turbionari care iau naștere în disc și fluxul magnetului permanent, apare un cuplu de sens opus celui de mișcare a discului*. Se obține astfel o amortizare a mișcărilor de oscilație în jurul poziției de echilibru.

2. ELEMENTE ACCESORII

Aceste elemente servesc la apărarea dispozitivului de măsurare împotriva acțiunilor exterioare, la fixarea și consolidarea dispozitivului de măsurare, la legarea aparatului în circuitul electric în care se efectuează măsurările etc.

---

* Cuplul respectiv se datorește unei forțe de frecare în cîmpul magnetic care este proporțională cu viteza de deplasare a discului. Acest tip de frecare se numește „frecare vîscoasă", prin analogie cu frecarea care se manifestă asupra unui piston cu orificii ce se deplasează într-un cilindru umplut cu un mediu vîscos (de exemplu ulei) și spre deosebire de „frecarea uscată" sau „coulombiană", care are loc între două corpuri solide și care nu este funcție de viteză.

Cutia aparatului adăpostește dispozitivul de măsurare și-l ferește atît împotriva acțiunilor mecanice exterioare, cît și împotriva acțiunilor prafului, umezelii, temperaturilor exterioare etc.

Pe cutie sînt prevăzute bornele sau șuruburile la care se fac legăturile aparatelor, iar pentru aparatele de tablou sînt prevăzute și șuruburile sau găurile de prindere; aparatele portative mai au în plus curea de transport, piciorușe de cauciuc etc.

D. TIPURI DE APARATE ELECTRICE DE MĂSURARE

1. APARATE MAGNETOELECTRICE

Circuitul magnetic al acestui tip de aparate electrice de măsurare este format dintr-un magnet permanent, între ai cărui poli se poate roti o bobină (fig. 3.7). La capetele magnetului, care are o formă de potcoavă, sînt prinse de polii săi două piese polare *1* și *2*, care cuprind între ele un cilindru de oțel moale *3*. Între piesele polare și piesa *3* există un întrefier circular și uniform de circa 2 mm, în care cîmpul magnetic este radial, avînd liniile de forță situate permanent în planul bobinei mobile *4*.

Echipajul mobil, reprezentat în figura 3.8, este construit dintr-un cadru ușor de aluminiu, pe care se află bobina *1*, formată din înfășurarea unui con-

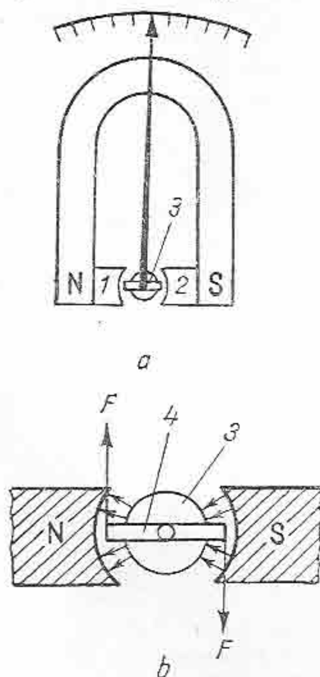


Fig. 3.7. Schema de principiu a aparatului magnetoelectric.

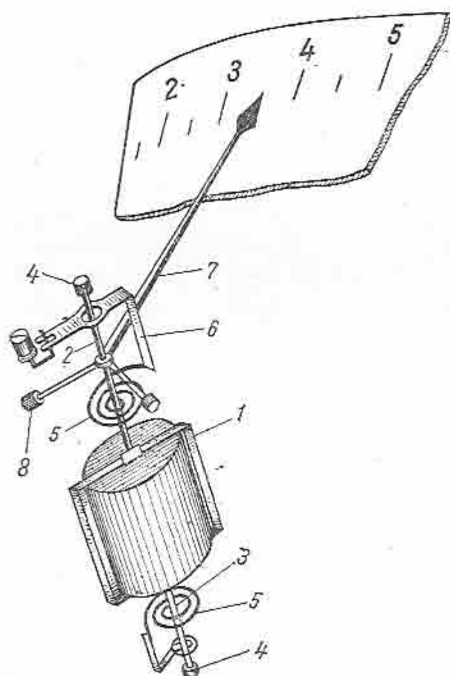


Fig. 3.8. Echipajul mobil al aparatelor magnetoelectrice.

ductor subțire de cupru sau de aluminiu. El este fixat pe două semiaxe *2* și *3*, care se rotesc în lagărele *4*. De semiaxe sînt prinse două resorturi spirale *5*, care creează cuplul rezistent (antagonist). Capătul fix al resortului inferior este prins la șasiul aparatului, iar al celui superior la furca *6* a corectorului de zero. Pe semiaxul *2* superior este fixat acul indicator *7*, care se deplasează în fața scării gradate. El este echilibrat de contragreutățile *8* care au poziții reglabile.

Bobina *1* este conectată în circuitul electric prin intermediul celor două resorturi spirale *5* și a două borne.

Funcționarea aparatului are loc în felul următor: ca urmare a interacțiunii dintre cîmpul magnetic al magnetului permanent și curentul I care parcurge bobina, asupra părților active ale spirelor acesteia, care se află în întrefier, apare un sistem de forțe ce dă naștere unui cuplu activ M_a. Acest cuplu se determină cu relația (3.1), în care variația energiei magnetice, la rotirea echipajului mobil cu un unghi elementar $\mathrm{d}\alpha$, se produce ca urmare a variației fluxului magnetic Φ, adică:

$$M_a = \frac{\mathrm{d}W_m}{\mathrm{d}\alpha} = I\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}\alpha}. \tag{3.6}$$

Ținîndu-se seamă de faptul că în întrefier cîmpul magnetic este radial și uniform, fluxul magnetic va varia conform relației:

$$\mathrm{d}\Phi = BSN\,\mathrm{d}\alpha, \tag{3.7}$$

în care:

B este inducția magnetică din întrefier;
S — suprafața activă a bobinei;
N — numărul de spire al bobinei.

Rezultă că:

$$M_a = \frac{\mathrm{d}W_m}{\mathrm{d}\alpha} = I\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}\alpha} = BSNI. \tag{3.8}$$

Bobina mobilă se va roti pînă cînd cuplul rezistent M_r determinat de resorturile spirale și care este proporțional cu deviația ($M_r = D\alpha$) va echilibra cuplul activ.

Cu ajutorul relației de echilibru dintre cupluri ($M_a = M_r$) se obține valoarea unghiului de deviație, care este proporțională cu intensitatea curentului, adică:

$$\alpha = \frac{BSN}{D}I = S_i I. \tag{3.9}$$

Mărimea $S_i = \frac{BSN}{D} = \frac{\alpha}{I}$ este o constantă și reprezintă sensibilitatea aparatului față de curent, adică deviația echipajului mobil pentru un curent egal cu unitatea.

Aparatele magnetoelectrice se pot utiliza pentru măsurarea atît a curenților, cît și a tensiunilor, însă numai în curent continuu*. În ambele cazuri, scara este uniformă, deoarece atît curentul cît și tensiunea sînt proporțio-

---

* În curent alternativ, echipajul mobil nu poate urmări variațiile cuplului activ — care este, de asemenea, alternativ — din cauza momentului său de inerție relativ mare. Datorită acestui fapt, deviația sa va fi determinată de cuplul activ mediu corespunzător unei perioade care pentru curent alternativ sinusoidal este zero.

nale cu deviația α. Ea este etalonată direct în amperi sau în volți prin intermediul unei constante de curent C_i sau de tensiune C_u a aparatului.

Constanta de curent C_i reprezintă o mărime inversă sensibilității aparatului, conform relației:

$$C_i = \frac{I}{S_i} = \frac{I}{\alpha}, \tag{3.10}$$

care arată că mărimea de măsurat este totdeauna proporțională cu deviația, adică:

$$I = C_i \alpha. \tag{3.11}$$

O relație analoagă se deduce și pentru tensiune. Într-adevăr, dacă se notează cu R rezistența bobinei aparatului, rezultă că pentru obținerea unei anumite intensități de curent este necesară aplicarea la bornele bobinei a unei tensiuni:

$$U = RI = RC_i\alpha = C_u\alpha, \tag{3.12}$$

în care $C_u = RC_i$ este constanta de tensiune a aparatului.

Aparatele magnetoelectrice sînt foarte mult folosite în practică la măsurarea curenților și a tensiunilor, datorită următoarelor calități: sensibilitate și precizie mare, consum redus de energie, influență redusă a variațiilor de temperatură asupra măsurărilor, mai ales în cazul miliampermetrelor, scară uniformă. Ele au însă dezavantajul de a nu funcționa decît în curent continuu* și de a nu suporta supraîncălziri mari (curentul de măsurat trecînd prin arcurile spirale, provoacă încălzirea acestora, ceea ce determină pierderea elasticității și, în unele cazuri, arderea lor).

2. APARATE ELECTRODINAMICE

Aparatele electrodinamice funcționează datorită acțiunii dintre două bobine — una fixă și alta mobilă — parcurse de curentul I, după următorul principiu: în poziția inițială, cînd prin spirele bobinelor nu circulă curent, axele lor sînt perpendiculare între ele, așa cum se observă în figura 3.9, *a*. Cînd acestea sînt parcurse de curenți, bobina mobilă *2* se rotește în interiorul

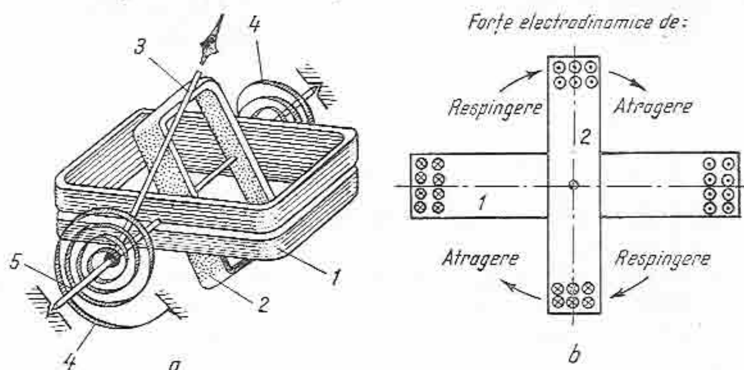


Fig. 3.9. Schema de principiu a aparatelor electrodinamice.

* Extinderea domeniului pentru curent alternativ se va face cu ajutorul unor elemente speciale (de exemplu, redresoare).

bobinei fixe *1*, ca urmare a forţelor electrodinamice ce se manifestă între conductoarele parcurse de curenţi (fig. 3.9, *b*). După cum se ştie din electrotehnică, forţele electrodinamice sînt *de respingere*, cînd curenţii în două conductoare paralele au sensuri contrare (⊗ şi ⊙), sau *de atragere*, cînd aceştia au acelaşi sens (⊗ şi ⊗ sau ⊙ şi ⊙).

Bobina mobilă este fixată rigid pe axul *5* al sistemului mobil, de care se mai găsesc prinse acul indicator *3*, resorturile pentru crearea cuplului rezistent *4*, precum şi dispozitivul de amortizare şi celelalte piese care nu au fost figurate, fiind asemănătoare cu cele din cazul precedent.

Aparatele ferodinamice se deosebesc de cele electrodinamice numai prin aceea că bobina fixă a lor este înfăşurată pe un miez de oţel moale, ceea ce permite obţinerea unui cîmp magnetic puternic şi, ca urmare, a unui cuplu activ mult mai mare decît la aparatele electrodinamice.

Cuplul activ, sub a cărui acţiune se deplasează bobina mobilă cu acul indicator, este determinat cu relaţia (3.1), în care energia magnetică este dată de relaţia:

$$W_m = \frac{1}{2}(L_1I_1^2 + L_2I_2^2) + M_{12}I_1I_2, \tag{3.13}$$

L_1 şi L_2 reprezentînd inductanţele proprii ale bobinelor, iar M_{12} — inductanţa lor mutuală.

Deoarece inductanţele proprii sînt constante şi nu depind de poziţia bobinelor una faţă de alta, rezultă că variaţia energiei magnetice este influenţată numai de inductanţa mutuală, care se modifică odată cu deviaţia α, astfel încît se poate scrie:

$$\mathrm{d}W_m = I_1I_2\cdot \mathrm{d}M_{12} \tag{3.14}$$

şi

$$M_a = I_1I_2\cdot\frac{\mathrm{d}M_{12}}{\mathrm{d}\alpha}. \tag{3.15}$$

Din această relaţie rezultă că cuplul activ al echipajului mobil depinde atît de curenţii din bobine, cît şi de poziţia reciprocă a acestora, adică de deviaţia α. Dacă sensul curenţilor se modifică simultan, sensul cuplului activ nu se schimbă, ceea ce arată că aparatele electrodinamice şi ferodinamice pot funcţiona atît în curent continuu, cît şi în curent alternativ.

Sub acţiunea cuplului activ, sistemul mobil se roteşte pînă cînd acest cuplu este echilibrat de cuplul rezistent $M_r (M_r = D\alpha)$. În situaţia de echilibru, cele două cupluri sînt egale, astfel încît se poate scrie:

$$I_1I_2\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}\alpha} = D\alpha. \tag{3.16}$$

Aparatul este construit cu cîmp magnetic radial, în care caz factorul $\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}\alpha} = \text{const.} = k_1$; cu această notaţie se obţine:

$$\alpha = I_1I_2\cdot\frac{k_1}{D} = kI_1I_2, \tag{3.17}$$

în care prin k s-a notat raportul constant $\frac{k_1}{D}$.

Relaţia (3.17) reprezintă relaţia de gradare a scării în curent continuu.

În curent alternativ, valabilitatea relației (3.17) se menține, cu observația că produsul dintre cei doi curenți este un produs scalar, astfel încît se poate scrie:

$$\alpha = kI_1 \cdot I_2 \cdot \cos(I_1 I_2). \tag{3.18}$$

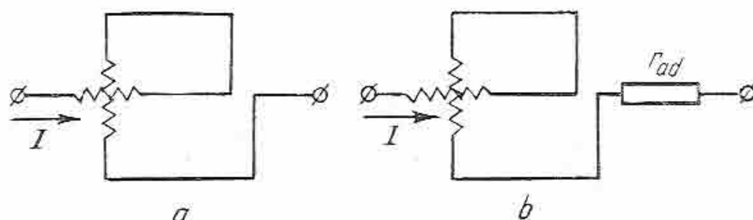


Fig. 3.10. Legarea bobinelor unui aparat electrodinamic.

Dacă cele două bobine sînt conectate în serie, atunci cei doi curenți sînt egali ca modul și au aceeași fază, deci relațiile (3.17) și (3.18) coincid. Deviația echipajului mobil devine în acest caz:

$$\alpha = kI^2, \tag{3.19}$$

adică este proporțională cu pătratul intensității curentului, deci scara aparatului este neliniară.

Legarea în serie a celor două bobine se face ca în figura 3.10, *a*. Dacă la cele două înfășurări ale aparatului electrodinamic se leagă în serie o rezistență adițională r_{ad}, ca în figura 3.10, *b*, atunci el poate fi utilizat și ca voltmetru. În acest caz, deviația unghiulară a sistemului mobil este:

$$\alpha = k_1 I^2 = k_1 \frac{U^2}{R^2} = k_2 U^2, \tag{3.20}$$

în care R reprezintă rezistența totală a celor două bobine și a rezistenței adiționale.

Aparatele electrodinamice pot fi utilizate și pentru măsurarea puterii. În acest caz, bobina fixă este alimentată cu curentul circuitului (conectată în serie cu aceasta), iar la bornele bobinei mobile se aplică tensiunea circuitului.

Precizia măsurărilor cu aparatele electrodinamice este foarte mare, ceea ce face ca ele să fie utilizate ca aparate de laborator (cu clase de precizie 0,2—0,5) și ca aparate-etalon pentru circuitele de curent alternativ. Indicațiile obținute în curent continuu și alternativ sînt identice.

Erorile măsurărilor cu aparatele electrodinamice sînt provocate de prezența cîmpurilor magnetice exterioare. Variația temperaturii mediului ambiant și a frecvenței influențează în mod neglijabil indicațiile aparatelor. Pentru eliminarea influenței cîmpurilor exterioare, dispozitivele de măsurat electrodinamice se execută ecranate.

3. APARATE ELECTROMAGNETICE (feromagnetice)

Aparatele electromagnetice se bazează pe interacțiunea dintre cîmpul magnetic al unei bobine fixe, parcursă de curentul de măsurat, și unul sau mai multe miezuri mobile, constituite din material feromagnetic. Sistemul

mobil tinde să se așeze astfel, încît să întărească cîmpul magnetic al bobinei, adică energia magnetică a sistemului să devină maximă. Din punctul de vedere al interacțiunii elementelor sale, aceste aparate se împart în două mari categorii: *aparate de atracție*, la care bobina atrage miezul magnetic, și *aparate de respingere*, la care bobina respinge miezul magnetic.

Aparatele electromagnetice de atracție (fig. 3.11, *a*) sînt constituite dintr-o bobină plată *1*, prevăzută cu o fereastră îngustă, în care poate pătrunde miezul *2* din material magnetic moale, montat excentric pe axul *3*. Pe același ax sînt fixate acul indicator *4*, contragreutățile de echilibrare *5*, resortul *6*, care creează cuplul rezistent, legat cu celălalt capăt la furca corectorului *7* și paleta amortizorului *8*.

Cînd bobina este parcursă de curent, miezul magnetic din oțel moale este atras în interiorul acesteia, provocînd, sub acțiunea cuplului activ care ia naștere, rotirea sistemului mobil.

Cuplul activ este determinat din aceeași ecuație generală (3.1) în care energia cîmpului magnetic produs de bobina cu inductanță L, cînd aceasta este parcursă de curent, este dată de relația:

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2. \tag{3.21}$$

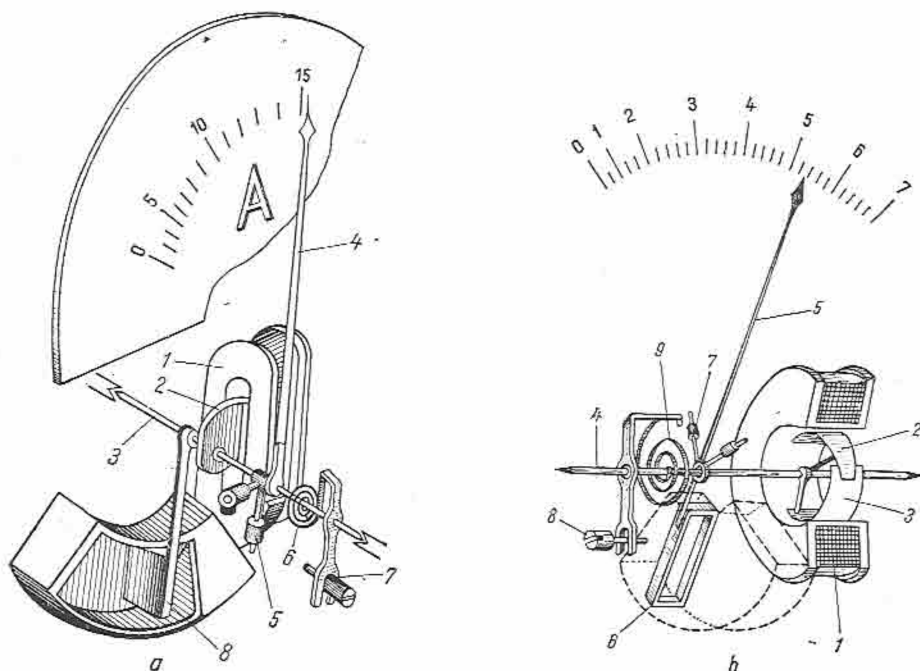


Fig. 3.11. Aparate electromagnetice:
a — de atracție; *b* — de respingere.

Variaţia energiei se datoreşte modificării inductanţei bobinei* în funcţie de unghiul de rotaţie α (de poziţia miezului magnetic în bobină). Ca urmare, se poate scrie:

$$M_a = \frac{\mathrm{d}W_m}{\mathrm{d}\alpha} = \frac{1}{2} I^2 \frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}\alpha}. \quad (3.22)$$

Cuplul rezistent dat de resortul *6*, care acţionează asupra axului, este proporţional cu unghiul de rotaţie, iar expresia sa se obţine din relaţia (3.3).

Sub acţiunea celor două cupluri, la echilibru, dispozitivul de măsurare se stabileşte la o anumită deviaţie α, a cărei valoare este:

$$\alpha = \frac{1}{2D} I^2 \frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}\alpha}. \quad (3.23)$$

Din această relaţie rezultă că, dacă $\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}\alpha}$ este constant, scara gradată a aparatului este pătratică, adică:

$$\alpha = \frac{K_1}{2D} I^2 = KI^2. \quad (3.24)$$

În acest caz, subdiviziunile ei se îndesesc spre gradaţia zero a aparatului. Astfel, în cazul unui ampermetru electromagnetic de 10 A, a cărui scară are 100 de diviziuni egale, indicaţia de 1 A va fi situată la prima diviziune, indicaţia de 2 A, la a patra diviziune (2^2), indicaţia de 5 A, la 25-a diviziune (5^2), indicaţia de 8 A, la a 64-a diviziune şi, în sfîrşit, indicaţia de 10 A, la a 100-a diviziune (ultima).

Dacă se modifică forma pieselor feromagnetice şi poziţia lor iniţială faţă de bobină, factorul $\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}\alpha}$ poate avea valori mai mari pentru curenţi mici şi valori mai mici pentru curenţi mari. În acest fel se poate obţine o scară gradată aproape uniform, începînd de la 15 la 20% din valoarea limită superioară a mărimii de măsurat.

Aparatele electromagnetice de respingere (fig. 3.11, *b*) sînt construite dintr-o bobină rotundă *1*, în interiorul căreia se află două piese din material magnetic moale, una fixă *2* şi alta mobilă *3*, solidară cu axul *4*. În figură se mai disting acul indicator *5*, amortizorul *6*, contragreutăţile *7*, dispozitivul corector *8* şi resortul spiral *9* care creează cuplul rezistent.

Cînd bobina este parcursă de curent, ambele piese se magnetizează în mod identic şi, ca urmare, se resping. Piesa magnetică *2* fiind fixă, deviaţia acului indicator cu un unghi oarecare α este asigurată prin rotirea piesei mobile *3*, solidară cu axul *4*. Cuplul activ şi ecuaţia de gradare a scării se deduc ca în cazul indicat mai înainte.

Din analiza relaţiei de funcţionare (3.24) rezultă că aparatele electromagnetice se pot utiliza atît în curent continuu, cît şi în curent alternativ, deoarece deviaţia sistemului mobil este proporţională cu pătratul curentului şi nu este influenţată de schimbarea de sens a curentului alternativ.

Precizia măsurărilor aparatelor electromagnetice este influenţată de fenomenul de histerezis magnetic şi de curenţii turbionari care apar în piesele

---

* Se ştie din electrotehnică că variaţia inductanţei unei bobine este realizată prin introducerea sau scoaterea unor beţişoare de oţel în interiorul acesteia.

feromagnetice. Din această cauză, aparatele electromagnetice se construiesc pentru clasele de precizie 0,5—2,5 şi se utilizează mai ales ca aparate de tablou, în domeniul frecvenţelor industriale (50 Hz). Ele au o construcţie simplă, posibilităţi de măsurare a unor curenţi mari, fără şunturi sau transformatoare de curent, robusteţe şi cost redus. Aceste calităţi le asigură utilizarea mai ales în măsurări industriale. Au însă precizie relativ mică, scară neuniformă, valorile măsurate fiind puternic influenţate de frecvenţa curentului de măsurat şi de cîmpurile magnetice exterioare, ceea ce face ca ele să nu fie utilizate ca aparate de laborator de mare precizie.

4. APARATE DE INDUCŢIE

Aparatele de inducţie funcţionează pe baza interacţiunii dintre unul sau mai multe fluxuri magnetice alternative şi curenţii induşi de acestea într-o piesă din material nemagnetic. În consecinţă, ele se vor compune din una sau din mai multe bobine fixe, parcurse de curenţi care creează fluxurile magnetice, şi un sistem mobil, format dintr-un disc sau tambur, de obicei din aluminiu, care se roteşte.

Schema de principiu a unui aparat de inducţie (fig. 3.12, *a*) cuprinde doi electromagneţi EM_1 şi EM_2 în al căror întrefier se roteşte un disc de aluminiu. Acul indicator este fixat de axul discului. Magnetul M_3 are rolul de amortizor, iar cuplul rezistent este asigurat, ca şi la celelalte aparate, de către un resort spiral.

Aparatul funcţionează astfel: bobinele electromagneţilor parcurse de curenţii I_1 şi I_2, defazaţi cu un unghi ψ, creează fluxurile magnetice Φ_1 şi Φ_2 (fig. 3.12, *b*). Aceste fluxuri, care sînt în fază cu curenţii care le-au produs, străbătînd discul din material nemagnetic, induc în acesta tensiunile electromotoare E_1 şi E_2 defazate în urmă cu 90° (fig. 3.13).

Tensiunile electromotoare produc curenţii I_1' şi I_2', care vor fi în fază fiecare cu tensiunea electromotoare corespunzătoare, deoarece inductanţa L

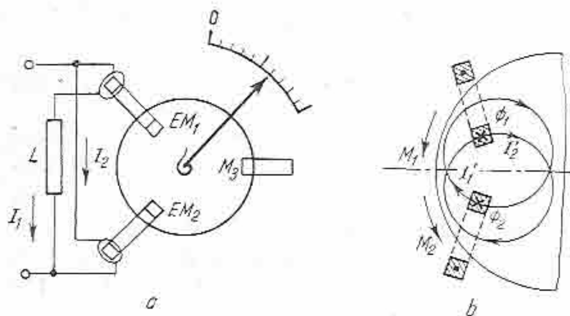


Fig. 3.12. Schema de principiu a aparatului de inducţie.

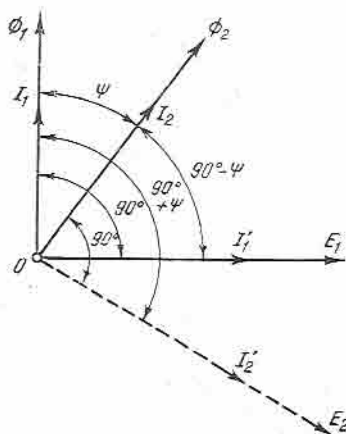


Fig. 3.13. Diagrama fazorială a fluxurilor şi curenţilor în aparatele de inducţie.

a discului este neînsemnată în comparaţie cu rezistenţa. Sensul curenţilor turbionari I'_1 şi I'_2 se află după regula burghiului.

Cuplul activ care ia naştere ca urmare a interacţiunii dintre un flux şi un curent este proporţional cu produsul acestora şi cosinusul unghiului de defazaj dintre ele. În cazul de faţă, cuplurile create între Φ_1 şi I'_1 şi Φ_2 şi I'_2 sînt nule, deoarece acestea sînt defazate între ele cu 90°, însă cuplurile care iau naştere ca urmare a interacţiunii dintre fluxul Φ_1 şi curentul I'_2 şi fluxul Φ_2 şi curentul I'_1 sînt diferite de zero, avînd valorile:

$$M_1 = K_1\Phi_1 I'_2 \cos(\widehat{\Phi_1 I'_2}) = K_1\Phi_1 I'_2 \cos(90° + \psi) = -K_1\Phi_1 I'_2 \sin\psi \quad (3.25)$$

şi

$$M_2 = K_2\Phi_2 I'_1 \cos(\widehat{\Phi_2 I'_1}) = K_2\Phi_2 I'_1 \cos(90° - \psi) = K_2\Phi_2 I'_1 \sin\psi. \quad (3.26)$$

Relaţiile (3.25) şi (3.26) au semne diferite, de unde rezultă că cele două cupluri vor acţiona în sensuri opuse. În realitate, ele acţionează în acelaşi sens, deoarece, aşa cum se vede din figura 3.12, *b*, cuplul M_1 acţionează în sensul respingerii circuitului curentului I'_2 din cîmpul Φ_1, în timp ce M_2 acţionează în sensul atragerii circuitului curentului I_2 în cîmpul Φ_2. Cele două cupluri acţionează deci în acelaşi sens şi, ca urmare, cuplul rezultant activ va fi egal cu suma lor, adică:

$$M_a = M_1 + M_2 = K_1\Phi_1 I'_2 \sin\psi + K_2\Phi_2 I'_1 \sin\psi =$$
$$= (K_1\Phi_1 I'_2 + K_2\Phi_2 I'_1)\sin\psi. \quad (3.27)$$

Sensul în care acţionează acest cuplu asupra discului va fi totdeauna de la polul parcurs de fluxul defazat înainte, Φ_1, spre cel defazat în urmă, Φ_2.

Cînd variaţia fluxurilor Φ_1 şi Φ_2 este sinusoidală, iar rezistenţa discului se consideră invariabilă şi practic de natură pur ohmică, curenţii induşi în disc I'_1 şi I'_2 sînt proporţionali cu frecvenţa f a curentului şi cu fluxurile respective, adică:

$$I'_1 = K_3 f\Phi_1 \quad \text{şi} \quad I'_2 = K_4 f\Phi_2, \quad (3.28)$$

în care K_3 şi K_4 sînt coeficienţi de proporţionalitate.

Ţinîndu-se seamă de relaţiile (3.26) şi (3.28), cuplul activ rezultant dat de relaţia (3.27) se poate pune sub forma:

$$M_a = (K_1\Phi_1 K_4 f\Phi_2 + K_2\Phi_2 K_3 f\Phi_1)\sin\psi = (K_1K_4 + K_2K_3) f\Phi_1\Phi_2 \sin\psi =$$
$$= K_5 f\Phi_1\Phi_2 \sin\psi = K'\Phi_1\Phi_2 \sin(\widehat{\Phi_1\Phi_2}), \quad (3.29)$$

care arată că, pentru o frecvenţă constantă, el este proporţional cu produsul dintre fluxurile magnetice produse de curenţii din bobine şi sinusul unghiului dintre acestea. Dacă unghiul de defazaj dintre aceste fluxuri este zero, cuplul activ este nul, deci discul nu se va mişca.

Sub acţiunea cuplului activ, discul se roteşte cu un anumit unghi α, corespunzător echilibrului dintre acesta şi cuplul rezistent ($M_r = D\alpha$). Indicaţia (deviaţia) aparatului rezultă din relaţia:

$$\alpha = \frac{K'}{D}\Phi_1\Phi_2 \sin\psi \quad (3.30)$$

sau, ţinîndu-se seamă de proporţionalitatea dintre curenţii I_1 şi I_2 şi fluxurile Φ_1 şi Φ_2:

$$\alpha = \frac{K}{D} I_1 I_2 \sin \psi = \frac{K}{D} I_1 I_2 \sin (\widehat{I_1 I_2}). \qquad (3.31)$$

care arată că unghiul de rotaţie al discului este proporţional cu produsul curenţilor ce străbat bobinele şi defazajul dintre ei.

Măsurările efectuate cu aparatele de inducţie au precizie mică, deoarece sînt influenţate de variaţia temperaturii mediului înconjurător, care modifică rezistenţa discului, şi deci curenţii induşi, precum şi de variaţia frecvenţei, care modifică reactanţa electromagneţilor, şi deci defazajul curenţilor şi al fluxurilor magnetice. De aceea, ele se utilizează numai ca aparate industriale, cu clase de precizie de 1—1,5.

Aparatele de inducţie prezintă însă şi multe avantaje ca, de exemplu, cuplu activ mare, posibilitatea de măsurare a unor curenţi cu intensitate mare, rezistenţă la supraîncălziri, siguranţă mare în funcţionare, construcţie robustă, influenţă redusă a cîmpurilor exterioare etc., ceea ce le face să fie totuşi folosite.

5. APARATE TERMICE

Principiul de funcţionare al aparatelor termice se bazează pe proprietatea firelor metalice de a se alungi atunci cînd sînt străbătute de un curent electric, ca urmare a efectului termic al acestuia.

În figura 3.14 este reprezentată schema de principiu a unui astfel de aparat, în care elementul principal îl reprezintă firul subţire *1*, constituit dintr-un aliaj de platină cu iridiu, fixat rigid la capete în clemele de alimentare *2* şi *3*. În punctul *4* al acestui fir este prins un al doilea fir metalic *5*, din bronz fosforos, care este fixat cu celălalt capăt de mecanismul corector de zero *6*. De mijlocul celui de-al doilea fir, în punctul *7*, este legat firul de mătase *8*, care este trecut peste un scripete *9* şi fixat la celălalt capăt de arcul lamelar *10*. Scripetele *9* este fixat pe axul *14*, pe care sînt fixate şi acul indicator *11*, şi sistemul de amortizare al aparatului, constituit dintr-un sector circular de aluminiu *12*, care se mişcă între polii magnetului permanent *13*.

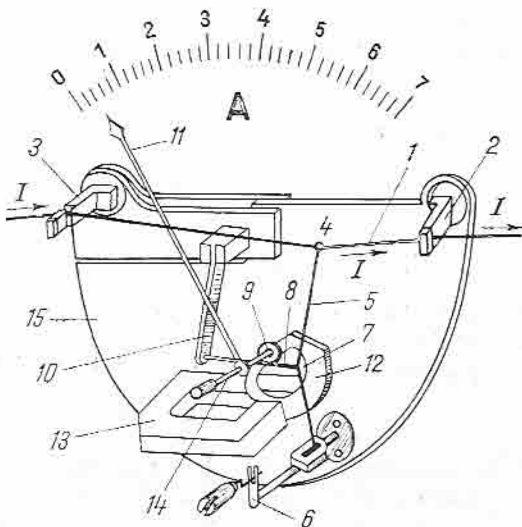


Fig. 3.14. Schema de principiu a unui aparat termic.

Cînd curentul de măsurat *I* trece prin firul metalic *1*, acesta se încălzeşte şi se alungeşte; ca urmare, punctul *4* coboară sub acţiunea resortului *10* care trage

firul de mătase *8* spre stînga şi roteşte scripetele *9*, peste care este înfăşurat, producînd deplasarea acului indicator *11*. În acest caz, alungirea firului subţire se transformă într-o mişcare de rotaţie a axului de care este fixat acul indicator.

Spre deosebire de celelalte aparate de măsurare, la aparatele termice cuplul activ este creat de resortul lamelar, de care se prinde firul de mătase, iar cuplul rezistent este creat de firul metalic prin care trece curentul.

Sub acţiunea efectului termic al curentului, firul capătă o alungire proporţională cu diferenţa de temperatură, adică:

$$\Delta L = L - L_0 = L_0\beta(T - T_0), \tag{3.32}$$

în care:

L_0 este lungimea firului la temperatura iniţială T_0;

L — lungimea firului la temperatura T, corespunzătoare unui curent de încălzire I;

β — coeficientul de dilatare liniară a firului.

Cantitatea de căldură ce se produce în unitatea de timp la trecerea curentului prin fir este proporţională cu rezistenţa R a acestuia şi cu pătratul curentului I, adică:

$$Q_1 = RI^2. \tag{3.33}$$

Cantitatea de căldură degajată în unitatea de timp în mediul exterior este proporţională cu diferenţa de temperatură şi se poate determina cu relaţia:

$$Q_2 = CS(T - T_0), \tag{3.34}$$

în care:

C este coeficientul total de transfer al căldurii prin radiaţie şi convecţie;

S — suprafaţa laterală a firului prin care se face transferul de căldură spre mediul exterior.

În starea de echilibru termic, întreaga căldură produsă este degajată în mediul exterior, respectiv există egalitatea:

$$RI^2 = CS(T - T_0), \tag{3.35}$$

de unde rezultă că:

$$T - T_0 = \frac{R}{CS} I^2 = K_1 I^2, \tag{3.36}$$

în care $K_1 = \frac{R}{CS}$ este o constantă de proporţionalitate, presupunîndu-se că suprafaţa laterală S, coeficientul C şi rezistenţa R practic nu variază cu temperatura.

Ţinîndu-se seamă de relaţiile (3.32) şi (3.36) în expresia alungirii, rezultă că:

$$\Delta L = L_0\beta K_1 I^2 = KI^2, \tag{3.37}$$

K reprezentînd factorul de proporţionalitate corespunzător.

Relaţia (3.37) pune în evidenţă faptul că alungirea firului şi, în consecinţă, şi deviaţia α a acului indicator, care este funcţie de aceasta, depinde de pătratul intensităţii curentului. Ca urmare, scara aparatului este pătratică, putînd fi etalonată direct în amperi.

Indicațiile aparatelor de măsurare termice nu sînt influențate de cîmpurile magnetice exterioare și nici de frecvența mărimii de măsurat. Datorită acestui fapt se pot utiliza la măsurări în curent alternativ de înaltă frecvență și de frecvență industrială. Ele sînt influențate însă de temperatura mediului ambiant, ceea ce constituie unul dintre dezavantajele principale. Pentru micșorarea acestei influențe, aparatele termice sînt echipate cu dispozitive de compensare. Compensarea este asigurată (fig. 3.14) de placa *15* (pe care este montat dispozitivul de măsurare), al cărei coeficient de dilatare este egal cu cel al firului activ. La alte aparate termice, dispozitivul de compensare este asigurat printr-un fir metalic cu același coeficient de dilatare ca al firului activ. Firul de compensare este legat la un capăt de clema *3*, care este fixată de un resort astfel că poziția clemei este influențată de lungimea firului de compensare. La variația temperaturii, lungimea firului de compensare variază, iar clema *3* se deplasează, astfel încît întinderea firului activ rămîne independentă de temperatură. Cu toate acestea, nu se poate realiza o poziție stabilă de zero a acului indicator. De aceea, aparatele termice sînt întotdeauna dotate cu corector, care readuce acul la zero, prin modificarea întinderii firului.

6. APARATE CU VIBRAȚIE

Pentru măsurarea frecvenței în rețelele electrice se utilizează aparatul cu vibrații cu lamele metalice, al cărui principiu de funcționare se bazează pe fenomenul de rezonanță mecanică a lamelelor, la anumite frecvențe ale curentului electric care alimentează aparatul. Aparatele cu vibrații se construiesc exclusiv ca frecvențmetre, schema de principiu a frecvențmetrului respectiv fiind redată în figura 3.15.

Aparatul este construit (fig. 3.15, *a*) dintr-o serie de lamele *1* de diferite lungimi și grosimi așezate una lîngă alta și fixate pe fața de jos a barei *2*, care la rîndul ei este fixată pe resoartele elastice *3*. Fiecare lamelă poate intra în rezonanță la o anumită frecvență de oscilație a armăturii metalice *4*, produsă de electromagnetul *5*. Armătura metalică *4* este prinsă pe bara *2*.

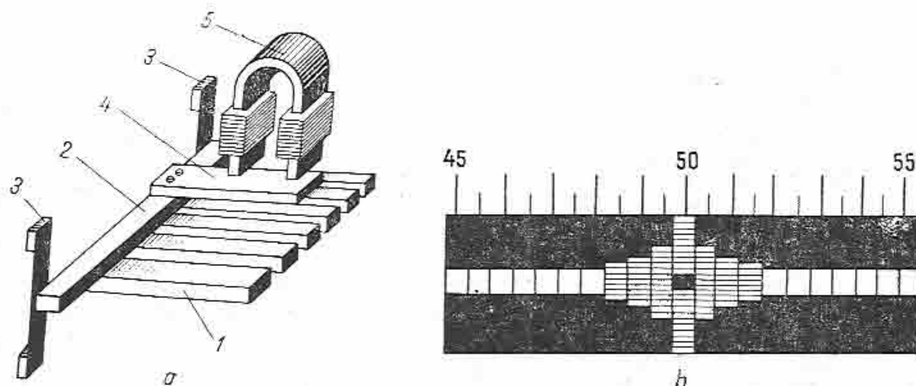


Fig. 3.15. Schema de principiu a unui frecvențmetru cu lamele *(a)* și scara aparatului *(b)*.

Cînd curentul alternativ străbate bobina electromagnetului *5*, forța de atracție (proporțională cu pătratul valorii instantanee a curentului) care se exercită asupra armăturii *4* crește și descrește de două ori într-o perioadă, într-un ritm imprimat de frecvența curentului alternativ, și transmite vibrațiile sale întregului sistem de lamele. Una dintre lamele, a cărei frecvență de oscilație coincide cu frecvența curentului de alimentare, va intra în rezonanță și va vibra puternic. Capetele lamelelor vopsite în alb se găsesc în fața unei scări gradate în herți (Hz — fig. 3.15, *b*), astfel încît vibrația fiecărei lamele corespunzătoare frecvenței curentului ce alimentează aparatul se poate citi direct. Dacă vibrează mai multe lamele, atunci frecvența măsurată corespunde lamelei care vibrează cel mai puternic. Dacă vibrează două lamele la fel de intens, frecvența măsurată va reprezenta media aritmetică a celor două indicații.

Frecvențmetrele avînd bobine de tensiune se conectează în rețea în derivație, indicîndu-se pe cadran tensiunea nominală pentru care sînt construite. De obicei, gama frecvențelor măsurate este cuprinsă între 45 și 55 Hz, cu lamele vibrante prevăzute din 0,25 în 0,25 Hz, adică cu clasa de precizie de 0,5.

7. APARATE ELECTROSTATICE

Aparatele electrostatice de măsurare se bazează pe principiul atracției a două piese metalice între care există o diferență de potențial. Unele dintre piesele metalice sînt fixe, iar altele — mobile.

Diferitele tipuri constructive ale acestor aparate corespund diverselor variante ale condensatorului plan cu armături fixe și mobile. În toate cazurile însă, deviația echipajului mobil este obținută prin variația capacității sistemului, care se poate realiza fie prin variația suprafeței active a armăturilor, fie prin variația distanței dintre acestea.

Aparatele electrostatice cu variație a suprafeței active a armăturilor (fig. 3.16) se compun din două perechi de plăci metalice fixe *1*, paralele între ele și legate electric, și două plăci mobile de aluminiu *2*, în formă de sector circular, fixate pe același ax cu acul indicator *3*.

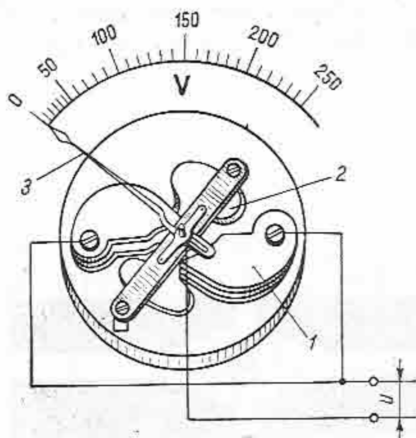


Fig. 3.16. Schema de principiu a aparatului electrostatic cu variația suprafeței active a armăturilor.

Aparatul funcționează astfel: la aplicarea unei tensiuni de măsurat între plăcile fixe și cele mobile, acestea se încarcă cu electricitate de semn contrar. Între ele apare un cîmp electric sub a cărui acțiune armăturile mobile se rotesc, tinzînd să ia o astfel de poziție încît energia înmagazinată în cîmpul electric să aibă o valoare maximă. Cuplul rezistent, care echilibrează cuplul activ produs prin variația energiei electrostatice cu unghiul de deviație, este produs de un resort spiral.

Cuplul activ se determină cu ajutorul unei relații asemănătoare cu re-

lația (3.1), în care în locul variației energiei magnetice se introduce variația energiei electrostatice W_e. Dacă se notează cu U tensiunea continuă de măsurat, aplicată între plăcile sistemului, și cu C, capacitatea lui, atunci:

$$W_e = \frac{1}{2} CU^2 \tag{3.38}$$

și

$$M_a = \frac{dW_e}{d\alpha} = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{d\alpha}. \tag{3.39}$$

La echilibru, cînd sistemul mobil a căpătat o deviație α, cuplul rezistent este egal cu cuplul activ, adică:

$$D\alpha = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{d\alpha}, \tag{3.40}$$

de unde rezultă că:

$$\alpha = \frac{U^2}{2D} \frac{dC}{d\alpha}. \tag{3.41}$$

Cînd aparatul se conectează într-un circuit de curent alternativ, încărcările plăcilor electrostatice variază ca și tensiunea, iar forța de atracție dintre ele rămîne îndreptată în același sens. Deviația echipajului mobil va fi determinată de valoarea cuplului activ mediu, în cursul unei perioade, fiind proporțională cu pătratul valorii efective a tensiunii aplicate.

Deoarece relația (3.41) pune în evidență faptul că deviația sistemului mobil depinde de pătratul tensiunii și de variația capacității lui, rezultă că scara aparatelor electrostatice este pătratică. În unele cazuri însă, prin anumite modificări constructive, care privesc forma și dimensiunile sistemului de plăci, se poate obține o scară gradată aproape uniform.

Aparatele electrostatice cu variația distanței dintre armături au schema constructivă de principiu reprezentată în figura 3.17. Sistemul fix este format din plăcile *1* și *2*, iar sistemul mobil din placa *3*, suspendată cu două benzi subțiri de bronz *4*. Placa fixă *1* este legată electric cu placa mobilă și izolată de cealaltă placă fixă *2*.

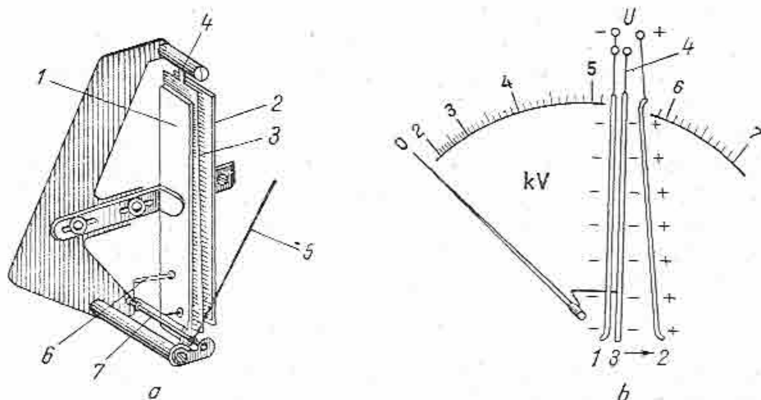


Fig. 3.17. Schema de principiu a aparatului electrostatic cu variația distanței dintre armături:
a — schema constructivă; *b* — scara aparatului.

Cînd se aplică tensiunea de măsurat la bornele aparatului, placa fixă *1* şi placa mobilă *3* se încarcă cu electricitate de acelaşi semn, în timp ce placa fixă *2*, cu electricitate de semn contrar. Sub acţiunea cîmpului electric ce ia naştere, se produce o deplasare a plăcii mobile, care este respinsă de placa fixă *1* şi atrasă de placa fixă *2*. Această deplasare se transmite acului indicator *5* prin intermediul unei tije *6*, care traversează placa fixă *1* şi care face legătura între placa mobilă *3* şi axul *7*. Cuplul activ este generat şi, în acest caz, de variaţia energiei electrostatice cu capacitatea sistemului, respectiv, cu distanţa dintre plăci*. Cuplul rezistent este dat de greutatea plăcilor mobile, ceea ce constituie un inconvenient, deoarece impune ca aparatul să fie totdeauna astfel aşezat încît acul indicator să stea pe reperul zero.

Aparatele electrostatice se utilizează aproape în exclusivitate ca voltmetre, avînd avantajul că măsurarea tensiunilor are loc practic fără consum de energie. Indicaţiile lor nu depind de temperatură, de cîmpurile magnetice exterioare, de frecvenţă etc., fiind influenţate numai de cîmpurile electrice exterioare. Influenţa acestora este însă micşorată prin ecranarea electrostatică.

Clasele de precizie pentru care se construiesc aparatele electrostatice sînt, de regulă, 1 şi 2.

8. APARATE LOGOMETRICE (logometre)

Logometrele sînt aparate care permit măsurarea raportului dintre doi curenţi sau dintre două tensiuni. Ele se deosebesc de celelalte aparate electrice de măsurare prin aceea că cuplul rezistent este creat în acelaşi mod ca şi cuplul activ. De aceea, teoretic, construcţia logometrelor se poate concepe pornindu-se de la oricare dintre aparatele de măsurare electrice descrise, cu excepţia celor electrostatice şi a celor termice.

Dispozitivele de măsurare, în ansamblul lor, pot avea o serie de piese comune, cum ar fi, de exemplu, magnetul permanent la logometrele magnetoelectrice, sistemul mobil comun la logometrele electromagnetice etc.

Sistemul mobil este format din două bobine fixate rigid pe acelaşi ax şi încrucişate sub un anumit unghi, cuprins între 5 şi 90°, acesta depinzînd de sensibilitatea ce se urmăreşte să se dea aparatului, de regularitatea diviziunii scării etc.

În figura 3.18 sînt arătate principiile de funcţionare a logometrelor magnetoelectrice. Cele două bobine ale echipajului mobil sînt parcurse de curenţi, care, interacţionînd cu cîmpul magnetic de inducţie magnetică B, creată de magnetul permanent, produc două cupluri. Cuplul M_1 produs de curentul i_1, care parcurge prima bobină, este:

$$M_1 = K_1 i_1 B \sin \alpha, \tag{3.42}$$

în care α este unghiul pe care-l face bobina respectivă cu planul perpendicular pe direcţia liniilor de forţă ale cîmpului magnetic.

* Capacitatea unui condensator plan este invers proporţională cu distanţa dintre plăci (grosimea dielectricului).

Cuplul produs de curentul i_2, care parcurge cea de-a doua bobină, încrucişată la un unghi δ faţă de prima bobină, este:

$$M_2 = K_2 i_2 B \sin(\delta - \alpha), \tag{3.43}$$

unde K_1 şi K_2 sînt două constante de proporţionalitate.

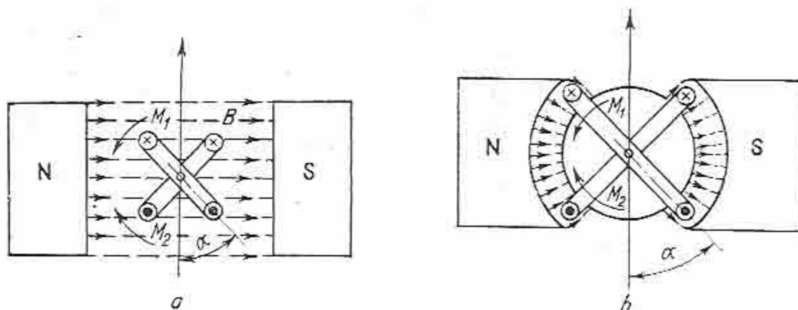


Fig. 3.18. Schema de principiu a logometrului magnetoelectric:
a — cu cîmp de inducţie omogen; *b* — cu cîmp de inducţie cu repartiţie radială sinusoidală.

Unul dintre aceste cupluri poate fi echivalent cu cuplul activ, iar celălalt cu cuplul rezistent, sensurile lor de acţionare fiind opuse. Sub acţiunea diferenţei celor două cupluri, sistemul mobil se roteşte în aşa fel, încît, pe măsura rotirii, cuplul mai mare (activ) se micşorează, iar cel mai mic (rezistent) creşte, pînă la echilibrare, cînd ele devin egale, adică:

$$K_1 i_1 B \sin\alpha = K_2 i_2 B \sin(\delta - \alpha) \tag{3.44}$$

sau

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{K_2}{K_1} \cdot \frac{\sin(\delta - \alpha)}{\sin\alpha} = K\,\frac{\sin(\delta - \alpha)}{\sin\alpha}. \tag{3.45}$$

Dacă bobinele sînt încrucişate la 90° [$\delta = 90°$, deci $\sin(90 - \alpha) = \cos\alpha$], atunci relaţia (3.45) devine:

$$\frac{i_1}{i_2} = K' \operatorname{ctg}\alpha \tag{3.46}$$

sau

$$\alpha = K'' f\left(\frac{i_1}{i_2}\right), \tag{3.47}$$

care arată că deviaţia sistemului mobil este funcţie de raportul dintre cei doi curenţi.

În figura 3.19, *a* este reprezentată schema de principiu a logometrelor electrodinamice, iar în figura 3.19, *b*, a celor ferodinamice. În acest caz, cuplurile sînt determinate de interacţiunea dintre curenţii i_1 şi i_2, care parcurg bobinele echipajului mobil, şi curentul I, care parcurge spirele bobinei fixe.

Cuplul activ M_1 produs de curentul i_1, care parcurge prima bobină este dat de relația:

$$M_1 = K_1 i_1 I \cos \varphi_1 \sin \alpha, \tag{3.48}$$

în care φ_1 este defazajul dintre curenții i_1 și I.

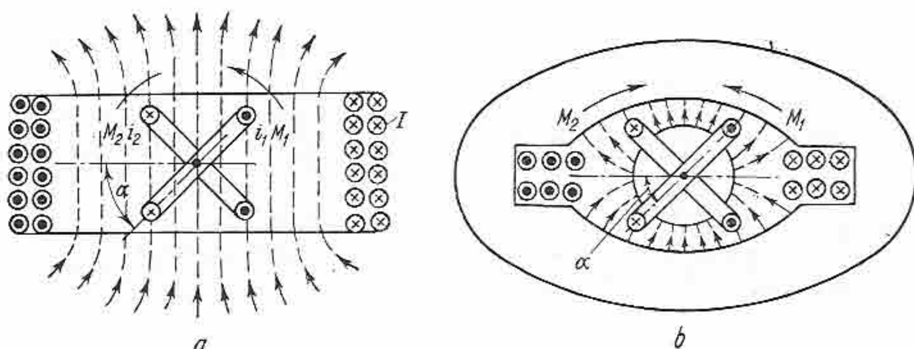


Fig. 3.19. Scheme de principiu ale logometrelor electrodinamice:
a — simplu; b — ferodinamic.

Cuplul rezistent M_2 produs de curentul i_2, care parcurge cea de-a doua bobină, încrucișată la un unghi δ cu prima, este dat de relația:

$$M_2 = K_2 i_2 I \cos \varphi_2 \sin (\delta - \alpha), \tag{3.49}$$

în care φ_2 reprezintă defazajul dintre curenții i_2 și I.

La echilibru se obține:

$$K_1 i_1 I \cos \varphi_1 \sin \alpha = K_2 i_2 I \cos \varphi_2 \sin (\delta - \alpha) \tag{3.50}$$

sau

$$\frac{i_1 \cos \varphi_1}{i_2 \cos \varphi_2} = \frac{K_2}{K_1} \cdot \frac{\sin (\delta - \alpha)}{\sin \alpha} = K' \frac{\sin (\delta - \alpha)}{\sin \alpha}. \tag{3.51}$$

În practică, situația de funcționare este astfel aranjată încît să existe relațiile:

$$\varphi_1 + \varphi_2 = 90^\circ \ ; \ \delta = 90^\circ.$$

Rezultă:

$$\frac{i_1 \cos \varphi_1}{i_2 \cos (90 - \varphi_1)} = K' \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \tag{3.52}$$

sau

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{K'}{\operatorname{ctg} \varphi_1} \cdot \operatorname{ctg} \alpha = K'' \operatorname{ctg} \alpha = K'' f(\alpha), \tag{3.53}$$

de unde:

$$\alpha = K f \left(\frac{i_1}{i_2} \right). \tag{3.54}$$

Cea mai largă răspîndire o au logometrele magnetoelectrice, care sînt folosite pentru măsurarea rezistențelor (ca ohmmetre) și a mărimilor neelectrice. Celelalte tipuri se utilizează la măsurarea frecvenței, a factorului de putere etc.

REZUMAT

Aparatele electrice se clasifică pe baza următoarelor criterii:

— *principiul de funcționare:* magnetoelectrice, electromagnetice, electrodinamice, de inducție etc.;
— *mărimea de măsurat:* ampermetre, voltmetre, wattmetre, varmetre, contoare etc.;
— *felul curentului:* continuu sau alternativ;
— *clasa de precizie:* 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 5;
— *modul de montare:* fixe și portabile;
— *modul de prezentare al măsurării:* indicatoare, integratoare și înregistratoare.

ÎNTREBĂRI RECAPITULATIVE

1. *Pot fi folosite aparatele magnetoelectrice în curent alternativ?*
2. *Ce asemănări și ce deosebiri sînt între aparatele electrodinamice și cele ferodinamice?*
3. *Se poate realiza din punct de vedere constructiv un ampermetru de inducție?*
4. *În ce condiții se poate construi un logometru pentru măsurarea frecvenței?*
5. *Depinde clasa de precizie a unui aparat de măsurare de mărimea scării aparatului respectiv?*

C A P I T O L U L 4

MĂSURAREA CURENȚILOR ȘI A TENSIUNILOR

A. CONSIDERAȚII GENERALE

Aparatele de măsurare a curenților și a tensiunilor se aleg în funcție de mărimea de măsurat și de valoarea acestei mărimi. Astfel, în practica industrială și de laborator este necesar să se măsoare curenți și tensiuni de valori foarte diferite, de la ordinul microamperilor sau al microvolților, pînă la sute de amperi și mii de volți, la frecvențe variind de la zero (curent continuu) pînă la sute de megaherți. De exemplu, pentru detectarea și măsurarea unor curenți foarte mici se utilizează galvanometrele (mai ales în instalațiile de laborator), în timp ce pentru măsurarea unor curenți mai mari se folosesc ampermetrele.

Pentru măsurări industriale și de laborator este necesar uneori să se cunoască variația în timp a curenților și a tensiunilor alternative sinusoidale, pentru a se putea explica fenomenele fizice care apar la funcționarea instalațiilor în anumite condiții. În aceste cazuri se utilizează osciloscopul sau oscilograful, cu ajutorul căruia se urmăresc direct variațiile în timp ale curenților și ale tensiunilor, respectiv prin imprimarea fenomenului de studiat pe o peliculă fotografică.

În tabelul 4.1 se indică principalele tipuri de aparate electrice de măsurare și mărimile pentru a căror măsurare se pot utiliza, iar în tabelul 4.2, domeniile lor de măsurare și posibilitățile de extindere prin folosirea de șunturi, rezistențe adiționale sau alte mijloace.

Metodele de măsurare a curenților și a tensiunilor depind de valoarea mărimii de măsurat și de precizia necesară.

Măsurările industriale, directe sau indirecte, se fac în mod obișnuit cu ampermetre și voltmetre, fără a fi necesară utilizarea unor aparate-etalon speciale. Rezultatele au o anumită precizie care, în general, este satisfăcătoare pentru scopul propus.

Măsurările de laborator sînt caracterizate de o precizie foarte mare, care se obține numai prin aplicarea unor metode speciale, cum ar fi metodele de compensare, sau prin folosirea unor aparate speciale, ca, de exemplu, galvanometrele.

În cele ce urmează se vor analiza mai întîi aparatele folosite pentru măsurarea curenților și a tensiunilor (ampermetre, voltmetre, galvanometre și osciloscoape), ținîndu-se seamă de caracteristicile lor generale și de domeniile de utilizare, și apoi metodele de măsurare.

TABELUL 4.1

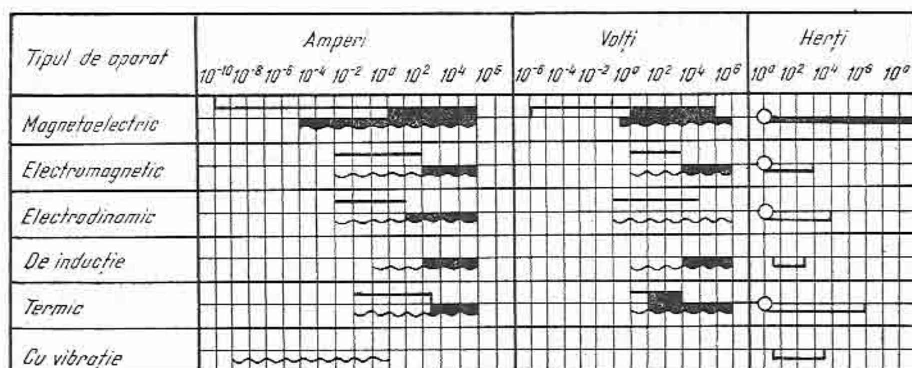
Tipuri de aparate electrice şi mărimi măsurate.

Aparatul de măsurat \ Mărimea măsurată	Curent continuu	Tensiune continuă	Curent alternativ	Tensiune alternativă	Putere activă	Putere reactivă	Frecvenţă	cos φ	Rezistenţă	Capacitate	Inductanţă
Magnetoelectric	□	□	⊠	⊠			⊠		⊠		
Feromagnetic	□	□	□	□					□		
Electrodinamic			□	□	□	□		□	□	□	□
Ferodinamic	□	□	□	□					□		
De inducţie			□	□	□	□	□	□	□	□	□
Termic	□	□	□	□	⊠						
Cu vibraţie							□				

□ Măsurare directă ⊠ Măsurare indirectă

TABELUL 4.2

Tipuri de aparate electrice şi domenii de măsurare.



Curent continuu fără / cu aparat auxiliar

Curent alternativ fără / cu aparat auxiliar

Domeniul de frecvenţă

○ Curent continuu

▭ Curent alternativ fără aparat auxiliar

▬ Curent alternativ cu aparat auxiliar

B. AMPERMETRE

Ampermetrele permit măsurarea directă sau indirectă a intensităţii curentului electric din instalaţiile industriale sau de laborator. Indicaţiile lor sînt date în mod obişnuit în amperi sau în multiplii sau submultiplii acestuia (kiloamperul şi miliamperul).

Legarea ampermetrelor în circuitele de măsurare se face în serie, în modurile reprezentate în schemele din figura 4.1. La tensiuni joase și curenți pînă la 300 A, ampermetrele se leagă direct (fig. 4.1, *a*); pentru curenți mai mari și pentru instrumente cu o precizie mai bună, legarea în circuit se face prin intermediul unui șunt în cazul curentului continuu (fig. 4.1, *b*), sau a unui transformator de măsurare de curent, în cazul curentului alter-

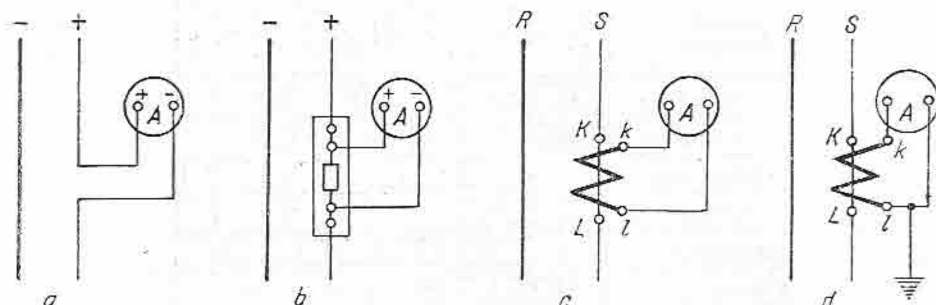


Fig. 4.1. Legarea ampermetrelor în circuitele de măsurare.

nativ (fig. 4.1, *c*). Șuntul, respectiv înfășurarea primară a transformatorului de măsurare, se leagă în serie cu circuitul în care urmează să se măsoare curentul, iar ampermetrul se leagă la bornele șuntului sau ale transformatorului. În cazul unor măsurări la înaltă tensiune, secundarul transformatorului de curent se pune la pămînt, ca în figura 4.1, *d*.

Deoarece ampermetrul se leagă totdeauna în serie, trebuie să aibă rezistența înfășurării mică, uneori chiar de ordinul miimilor de ohmi. În acest fel, consumul propriu de putere este foarte redus* și eroarea sistematică de metodă, introdusă asupra valorii măsurate, este mică. În general, consumul propriu al ampermetrelor variază între 0,2 și 10 W, în funcție de tipul acestora, așa cum se poate vedea din tabelul 4.3.

Ampermetrul magnetoelectric (cu cadru mobil și cu magnet permanent) funcționează atunci cînd bobina cadrului mobil este parcursă de un curent continuu. Echipajul mobil al aparatului se rotește cu un unghi α într-un anumit sens, corespunzător sensului curentului și proporțional cu acesta. Ca urmare, scara lui va fi gradată uniform**.

Ampermetrul magnetoelectric se poate lega în circuitul de măsură direct sau indirect, folosindu-se șunturile. În cazul unor curenți mici, pînă la 30—50 mA, se utilizează fără șunturi, ca miliampermetru, efectuînd măsurări directe. Pentru măsurarea curenților de la cîteva zeci de miliamperi pînă la 30 000 A se folosește împreună cu șunturi.

---

* Consumul de putere al ampermetrelor RI^2, modifică regimul de lucru al circuitelor și ca urmare și valoarea mărimii de măsurat, introducînd astfel o eroare sistematică de metodă. Această eroare va fi cu atît mai mică, cu cît consumul propriu este mai redus.

** Pentru ampermetrele magnetoelectrice utilizate în circuitele bateriilor de acumulatoare scara de măsurare are diviziunea zero la mijloc, datorită faptului că ele trebuie să indice ambele sensuri de circulație ale curentului și anume sensul de încărcare și cel de descărcare.

TABELUL 4.3

Valorile aproximative ale consumului propriu al diverselor tipuri de aparate

Nr. crt.	Tipul aparatului	Consumul W (VA)	
		Ampermetre și bobine serie, la un curent de 5 A	Voltmetre și bobine derivație, la o tensiune de 100 V
1	Ampermetru magnetoelectric	0,2–0,5	–
2	Ampermetru cu redresor	0,2–0,5	–
3	Ampermetru termoelectric	0,2–0,5	–
4	Ampermetru electromagnetic	1–2,5	–
5	Ampermetru electrodinamic	3,5–10	–
6	Ampermetru de inducție	4–7,5	–
7	Ampermetru termic	2–2,5	–
8	Ampermetru înregistrator	5–15	–
9	Voltmetru magnetoelectric	–	0,1–1
10	Voltmetru cu redresor	–	0,1–1
11	Voltmetru electromagnetic	–	4–6
12	Voltmetru electrodinamic	–	6–12
13	Voltmetru de inducție	–	5–10
14	Voltmetru termic	–	8–15
15	Voltmetru electronic	–	0,2–0,3
16	Voltmetru înregistrator	–	10–20
17	Wattmetru electrodinamic	1,5–5	3–5
18	Wattmetru de inducție	2–5	3–6
19	Wattmetru înregistrator	3–10	8–15
20	Fazmetru electrodinamic	3,5	5–8
21	Fazmetru ferodinamic	3,5	5–8
22	Contoare de inducție	1–5,2	1–4
23	Frecvențmetre	–	2–5

Șunturile sînt rezistențe electrice foarte mici, care se conectează în serie în circuitul de măsurat în locul ampermetrului, acesta din urmă legîndu-se în paralel cu șuntul, ca în figura 4.2.

Curentul I_A care trece prin ampermetru se determină cu relația:

$$I_A = \frac{R_s}{R_s + R_A} I, \tag{4.1}$$

în care:

R_s este rezistența șuntului;
R_A — rezistența ampermetrului;
$I = I_A + I_s$ — curentul total de măsurat;
I_s — curentul care trece prin șunt.

Din această relație se calculează valoarea curentului de măsurat:

$$I = I_A \frac{R_s + R_A}{R_s} = I_A\left(\frac{R_A}{R_s} + 1\right) = mI_A, \tag{4.2}$$

unde m este factorul de şuntare:

$$m=\frac{I}{I_A}=\frac{R_A}{R_s}+1, \qquad (4.3)$$

şi care indică de cîte ori curentul de măsurat este mai mare decît curentul care trece prin ampermetru.

Din relaţia (4.3) se obţine valoarea rezistenţei şuntului:

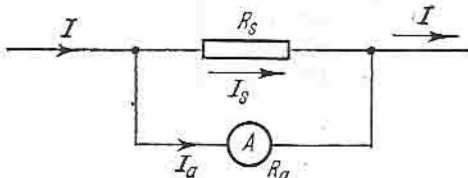


Fig. 4.2. Legarea ampermetrului magnetoelectric prin şunt.

$$R_s=\frac{R_A}{m-1}. \qquad (4.4)$$

În practică se utilizează montaje cu mai multe şunturi, avînd valori diferite ale rezistenţei, pentru ca prin schimbarea lor să se poată utiliza acelaşi aparat magnetoelectric cu mai multe scări de măsurare a curentului. Şunturile se montează fie în interiorul carcasei aparatului, fie în exterior, sub formă de piese separate.

Consumul propriu al ampermetrelor magnetoelectrice este foarte redus, 0,2—0,4 W, fiind în unele cazuri de ordinul miimilor de watt. Ca urmare, precizia lor de măsurare este foarte bună, putînd fi construite pentru clasa de precizie de 0,1.

Indicaţiile ampermetrelor cu şunt depind însă mult de variaţia temperaturii mediului înconjurător. Curentul de măsurat se distribuie în cele două circuite paralele — al bobinei mobile şi al şuntului, invers proporţional cu rezistenţa lor. Rezistenţele şuntului de manganină nu variază practic cu temperatura, în timp ce rezistenţa bobinei de cupru se modifică destul de mult (creşte cu 4% pentru fiecare 10 grd creştere de temperatură), ceea ce duce la o nouă redistribuire a curenţilor, indicaţiile aparatului devenind inexacte. De aceea, pentru micşorarea acestor influenţe, se folosesc diverse scheme de compensare.

În figura 4.3, *a* este reprezentată schema de compensare utilizată în cazul unor ampermetre magnetoelectrice cu clasa de precizie de 1 şi 1,5,

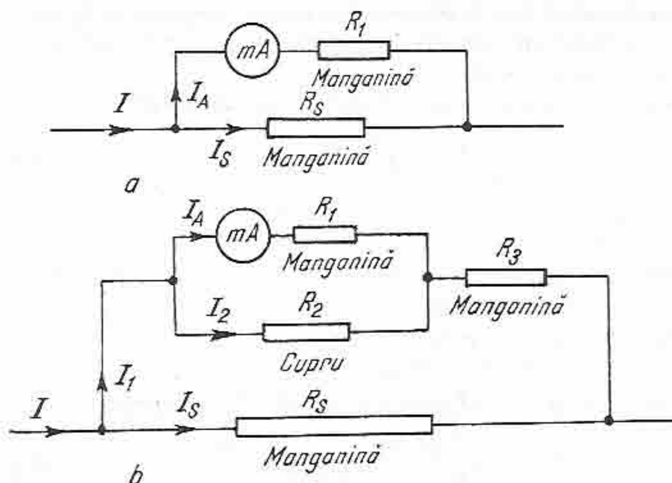


Fig. 4.3. Schema de compensare a variaţiei cu temperatura a indicaţiilor ampermetrelor magnetoelectrice:
a — serie; *b* — serie-paralel.

în care bobina mobilă se leagă în serie cu o rezistență de compensare R_1, din manganină. Pentru ampermetre magnetoelectrice cu clasa de precizie de 0,1, 0,2 și 0,5 se poate folosi schema de compensare serie-paralel, 4.3, *b*. În acesată schemă, bobina mobilă a aparatului de rezistență R_A, în serie cu rezistența de manganină R_1, se leagă în paralel cu o altă rezistență R_2, de cupru. Întregul ansamblu, în serie cu o a treia rezistență R_3 de manganină, este conectat în paralel cu rezistența R_s a șuntului, de asemenea de manganină.

Ampermetrul magnetoelectric cu alimentare prin redresor permite extinderea domeniului de măsurare a acestui tip de aparat la curentul alternativ. Elementele redresoare cu semiconductoare (diode cu germaniu, cu siliciu sau cu cuproxid) sînt legate între ele în diferite moduri, în scopul transformării curentului alternativ în curent continuu (redresat).

După numărul alternanțelor redresate, redresoarele pot fi: *cu simplă redresare* (monoalternanță) și *cu dublă redresare* (bialternanță).

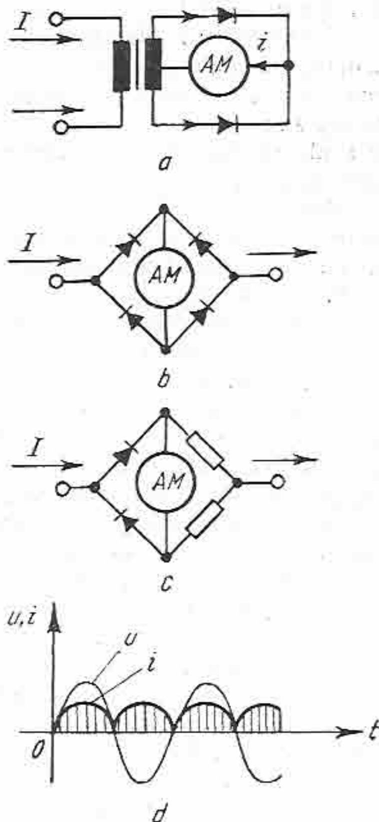


Fig. 4.4. Circuite de alimentare cu dublă redresare.

Aparatele care folosesc redresarea simplă se utilizează rar, deoarece curentul, trecînd numai în cursul unei singure alternanțe prin dispozitivul de măsurare, face ca cuplul activ și deci sensibilitatea lui să fie mici. Aparatele cele mai folosite sînt cele cu dublă redresare, cu circuitele de alimentare fie cu transformator cu priză mediană, ca în figura 4.4, *a*, fie în punte, ca în figura 4.4, *b* și *c*. Legarea redresoarelor este astfel făcută, încît pentru ambele alternanțe ale curentului alternativ curentul redresat circulă prin aparatul de măsurare *AM* în același sens (fig. 4.4, *d*). În cazul figurii 4.4, *c*, două brațe ale punții de alimentare sînt formate din rezistențe. Această schemă prezintă avantajul că reduce influența variațiilor temperaturii ambiante, însă are și dezavantajul că necesită aparate de măsurare mai sensibile, deoarece prin acestea nu trece decît o parte din curentul redresat în fiecare semiperioadă, una dintre rezistențe servind drept șunt.

Pentru netezirea pulsațiilor curentului redresat, în paralel cu aparatul de măsurat se conectează o capacitate.

Indicațiile ampermetrului magnetoelectric sînt proporționale cu valoarea medie a curentului alternativ. În curent alternativ este necesar însă să se măsoare valorile efective, ceea ce impune o gradare corespunzătoare a scării aparatelor. Acest lucru este posibil numai pentru o anumită formă a curbei curentului (obișnuit pentru forma sinusoidală). Cînd curba curentului redresat se modifică, apare o eroare suplimentară, cu atît mai mare cu cît curentul este mai nesinusoidal.

Aparatele cu redresoare se construiesc, în general, ca aparate universale, permițînd măsurarea atît a curenților, cît și a tensiunilor (voltampermetre) în mai multe domenii de măsurare. Pentru măsurarea curenților, ele se folosesc în combinație cu șunturi (la fel ca și ampermetrele magnetoelectrice), care se leagă în circuitul de curent alternativ și nu în cel redresat.

Se utilizează mai ales ca aparate industriale portabile, avînd o precizie de măsurare relativ mică (clase de precizie de 1,5 sau 2,5).

Ampermetrul electromagnetic (cu oțel moale) funcționează pe baza principiului general expus în capitolul 3, adică prin atracția exercitată de o bobină fixă, parcursă de curentul care se măsoară, asupra unei bucăți de oțel moale, sau prin respingerea exercitată de o piesă de oțel fixă, magnetizată cu ajutorul unei bobine parcursă de curentul care se măsoară, asupra unei piese mobile.

Datorită simplității constructive și robusteței lor, ampermetrele electromagnetice sînt cele mai utilizate aparate pentru măsurarea curenților alternativi. În același timp, ele se pot folosi și pentru măsurarea curentului continuu. Consumul lor propriu de putere este mai mare decît cel al ampermetrelor magnetoelectrice; datorită acestui fapt, ele se fabrică, în general, ca aparate de tablou cu clasă de precizie 1,5—2,5, precum și ca aparate portative și de laborator, cu clasă de precizie 0,5—1 și, mai rar, 0,2.

Conectarea lor în circuitul de măsurare se face direct cu bobina dispozitivului de măsurare legată în serie la circuitul de măsurare care, fiind fixă, poate fi construită pentru curenți nominali mari, pînă la 250—300 A. Pentru măsurarea curenților alternativi mai mari, ampermetrele electromagnetice se conectează indirect, împreună cu transformatoare de măsură de curent. Extinderea domeniului lor de măsurare nu se face cu șunturi, deoarece în acest caz ar crește consumul propriu al aparatelor, datorită faptului că este necesar să se monteze și rezistențe pentru compensarea erorilor de temperatură și de frecvență.

Ampermetrul electrodinamic funcționează pe baza interacțiunii dintre două bobine, una fixă și cealaltă mobilă, parcurse de curenți. Domeniul de măsurare a curenților este determinat de modul de conectare a celor două bobine (v. cap. 3). Bobina mobilă se leagă în serie cu cea fixă, cînd aparatul se folosește ca miliampermetru (curenți sub 0,5 A— fig. 4.5, *a*). Pentru aceste valori ale curenților este posibilă alimentarea bobinei mobile prin resorturi spirale. Pentru curenți mai mari, conectarea bobinelor în serie nu mai este posibilă, deoarece resorturile spirale s-ar încălzi prea mult și ar căpăta deformări, iar bobina mobilă ar deveni prea grea și s-ar înrăutăți factorul de calitate al aparatului. De aceea, aceste ampermetre se construiesc cu bobinele legate în derivație, ca în figura 4.5, *b*, sau cu bobina mobilă legată în derivație cu un șunt montat în serie cu bobina fixă (fig. 4.5, *c* și *d*).

Deviația sistemului mobil al aparatelor electrodinamice este proporțională cu pătratul curentului de măsurat. Ca urmare, scara de măsurare a aparatului este pătratică, cu diviziuni extinse spre finele scării. La ampermetrele electrodinamice moderne s-a reușit ca prin acționarea asupra constantei de funcționare* a aparatului să se realizeze o scară aproape uniformă

---

* Modificarea gradației scării se obține acționîndu-se asupra formei bobinelor, creîndu-se un dipozitiv de măsurat cu cîmp magnetic uniform, și asupra elementului antagonist, prin introducerea în serie cu circuitul de măsurare a unor elemente neliniare (de exemplu, lampă cu filament metalic sau cu filament cu cărbune).

pe toată lungimea ei, cu excepția porțiunii sale inițiale, care este comprimată pentru o zonă de pînă la 20—25% din lungimea scării.

Ampermetrele electrodinamice se pot folosi atît în curent alternativ, cît și în curent continuu, deoarece sensul în care se deplasează acul indicator nu se modifică la schimbarea sensului din bobine. Pentru ca indicațiile să fie aceleași atît în curent alternativ, cît și în curent continuu, curenții I_1 și I_2 trebuie să fie în fază, iar distribuția lor prin bobine să fie aceeași în ambele cazuri. Pentru aceasta, rezistențele și reactanțele celor două circuite în paralel se aleg astfel, încît constantele lor de timp să fie egale, adică:

$$\frac{X_{I}}{\omega R_{I}}=\frac{X_{II}}{\omega R_{II}}, \qquad (4.5)$$

în care R_I și R_{II}, X_I și X_{II} reprezintă rezistențele, respectiv reactanțele totale ale circuitelor în derivație. În acest scop se folosește un condensator C (fig. 4.5), care șuntează o parte din rezistența adițională.

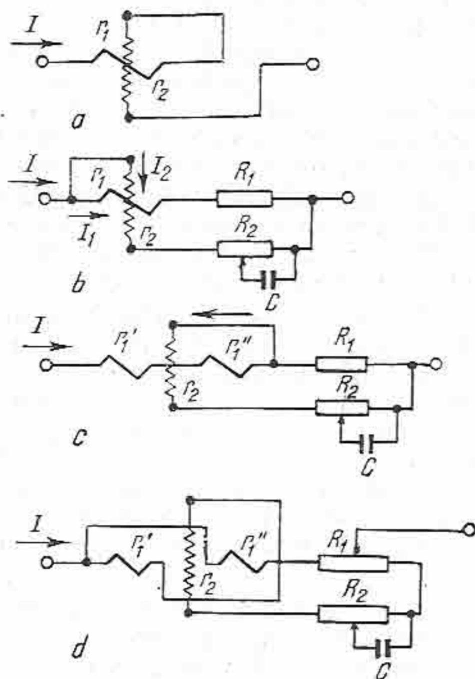


Fig. 4.5. Schemele de conexiuni ale bobinelor ampermetrelor electrodinamice.

Consumul propriu al ampermetrelor electrodinamice este cuprins între 3,5 și 10 W, iar clasa de precizie poate fi pînă la 0,2 (uneori se construiesc și instrumente cu clasă de precizie 0,1). Ele se construiesc pentru o singură zonă de măsurare (sensibilitate) sau pentru mai multe zone, prin divizarea și cuplarea diferită a bobinei fixe. În general, aceste aparate sînt destinate pentru măsurarea curenților cuprinși între 25 mA și 10 A, mai rar pînă la 50 A. Pentru măsurarea curenților mai mari se folosește legarea indirectă, prin intermediul transformatoarelor de măsurare de curent. Domeniul lor de măsurare nu se extinde cu ajutorul șunturilor, din aceleași motive arătate la ampermetrele electromagnetice.

Ampermetrul termic funcționează prin dilatarea unui fir metalic subțire parcurs de curentul electric care trebuie măsurat sau prin deformarea unui bimetal încălzit de curentul de măsurat (v. cap. 3). Consumul intern al acestor aparate este relativ scăzut, fiind construite pentru clase de precizie cuprinse între 1 și 2,5 și curenți nominali pînă la 5 A. Pentru curenți nominali mai mari au un șunt interior și necesită dispozitive speciale de compensare. Se utilizează în curent continuu și în curent alternativ și prezintă avantajul că, alături de ampermetrele cu termocuplu, sînt singurele aparate cu care se pot măsura curenții de înaltă frecvență, precum și curenții în regim deformat, mărimea măsurată fiind independentă de frecvență sau de existența armonicilor.

Ampermetrul cu termocuplu, folosit pentru măsurarea curenților de înaltă frecvență, are o funcționare asemănătoare cu cea a ampermetrului termic. El este constituit dintr-un filament, încălzit de curentul electric de măsurat, în contact termic cu un termocuplu, și dintr-un aparat de măsurare magnetoelectric (miliampermetru), alimentat de acest termocuplu.

Termocuplul este format din două conductoare din metale sau aliaje diferite, care sînt sudate la unul dintre capete. Datorită încălzirii capătului activ (sudat), prin contact direct sau indirect cu filamentul parcurs de curent, între capetele libere ale termocuplului apare o tensiune termoelectromotoare, e_T, care se aplică dispozitivului magnetoelectric. Tensiunea termoelectromotoare este proporțională cu cantitatea de căldură produsă de curentul măsurat pentru încălzirea capătului activ ($e_T = K \cdot I^2 \cdot R_f \cdot t$, R_f fiind rezistența firului încălzitor prin care trece curentul de măsurat). Ca urmare, scara aparatului este cvasiparabolică, indicațiile fiind proporționale cu pătratul valorii efective a curentului de măsurat, și deci independente de valoarea frecvenței.

După modul de încălzire a termocuplului, ampermetrele cu termocuplu sînt de două categorii: cu contact direct și fără contact direct.

Aparatele cu contact direct, prezentate în figura 4.6, au capătul activ al termocuplului *1* fixat pe firul încălzitor *2*, prin care trece curentul de măsurat. Astfel de aparate se folosesc pentru măsurări de curenți mari (între 1 și 300 A). Datorită faptului că se degajează o cantitate mare de căldură, ele se construiesc cu termocuplul așezat în aer și au borne de legătură masive, pentru a se evita supraîncălzirile. Indicațiile lor diferă într-o oarecare măsură de sensul curentului de măsurat, deoarece o parte din curentul de măsurat trece și prin termocuplu și se adună sau se scade, după sens, la curentul produs de tensiunea termoelectromotoare, fapt care constituie un dezavantaj al schemei.

Aparatele fără contact direct, al căror principiu este reprezentat în figura 4.7, *a* și *b*, elimină dezavantajul aparatelor cu contact, datorită faptului că termocuplul fiind încălzit prin radiație, nu este străbătut decît de curentul produs de tensiunea termoelectromotoare. Ele au însă dezavantajul că necesită o cantitate de căldură, mai mare, deci și un consum intern mărit.

Pentru mărirea tensiunii termoelectromotoare se înseriază mai multe termocupluri (fig. 4.7, *b*), iar pentru reducerea pierderilor de căldură, filamentul și termocuplul sînt montate într-un balon de sticlă cu vid, constituind un ansamblu numit, de obicei, cruce termoelectrică sau termocruce. Domeniul lor de măsurare este relativ restrîns, fiind cuprins între limitele 5 mA și 1 A.

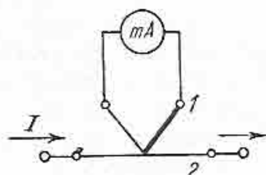


Fig. 4.6. Schema de principiu a termocuplului cu contact direct.

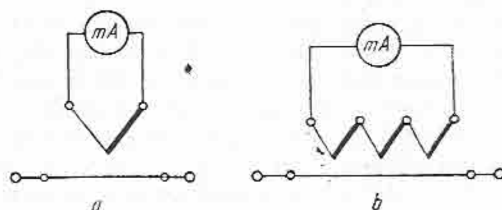


Fig. 4.7. Schema de principiu a termocuplului fără contact direct:
a — cu un singur termocuplu; *b* — cu mai multe termocupluri înseriate.

C. VOLTMETRE

În figura 4.8 sînt reprezentate schemele de montare a voltmetrelor, în curent continuu și în curent alternativ. În cazul tensiunilor înalte, înfășurarea primară a transformatorului de tensiune este conectată în derivație la circuitul de măsurare, iar voltmetrul — la secundarul transformatorului.

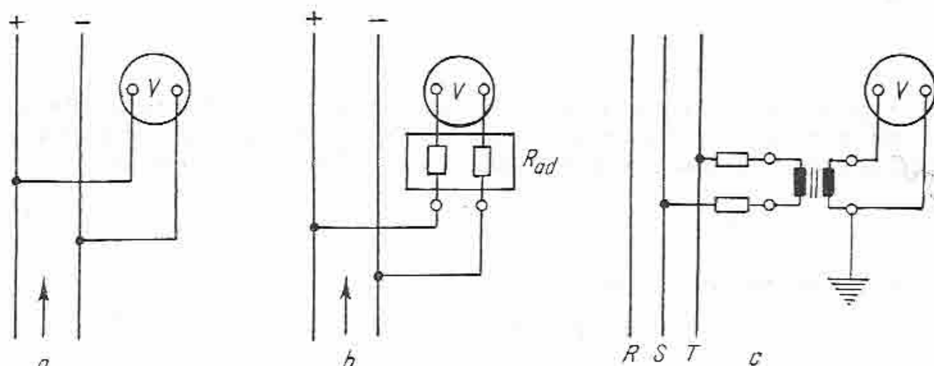


Fig. 4.8. Schema de conectare a voltmetrelor:
a — directă; *b* — cu rezistențe adiționale în serie; *c* — la secundarul unui transformator de tensiune.

Deoarece voltmetrele se leagă în derivație la rețeaua electrică a cărei tensiune se măsoară, ele trebuie să opună o rezistență cît mai mare curentului electric ce trece prin înfășurarea lor. De aceea, bobinele interioare ale acestora, spre deosebire de cele ale ampermetrelor, sînt confecționate din conductoare subțiri și cu rezistență cît mai mare posibil. În acest fel, curentul care se derivă prin voltmetre este foarte mic, deci consumul propriu redus, ceea ce face ca eroarea sistematică de metodă, introdusă asupra rezultatelor măsurărilor, să fie mică. În tabelul 4.3 s-a indicat acest consum propriu, care variază în funcție de tipul voltmetrelor, de la 0,1 pînă la 20 W.

Funcționarea voltmetrelor este asemănătoare cu cea a ampermetrelor. Curentul care circulă prin bobina I_v este dat de relația:

$$I_v = \frac{U_x}{r_g},$$

în care:

U_x este tensiunea necunoscută;
r_g — rezistența electrică a bobinei voltmetrului.

El este direct proporțional cu tensiunea de măsurat și produce deviația sistemului mobil al dispozitivului de măsurat:

$$\alpha = f_1(I_v) = f(U_x). \tag{4.6}$$

Conform acestei ultime relații, voltmetrele au dispozitivele de măsurare de construcție asemănătoare cu cea a ampermetrelor, deosebindu-se doar prin parametri, schema interioară și modul de legare la circuitul de măsurare. Intervalele lor de măsurare (în afara celor electrostatice) sînt cuprinse între 10 și 750 mV, fără rezistențe adiționale, și între 1,5 și 600 V, cu rezis-

tențe adiționale. Cînd măsurarea se face indirect, prin intermediul transformatoarelor de măsură de tensiune, ele au tensiunea nominală de 100 V.

Rezistențele adiționale se leagă în serie cu înfășurarea aparatului de măsurare, în interiorul sau în exteriorul cutiei voltmetrului. Valoarea lor se poate determina fără nici o dificultate.

Fie I, curentul care trece prin bobina voltmetrului, la deviația maximă a dispozitivului de măsurare:

$$I = \frac{U}{r_g}.$$

Același curent trebuie să parcurgă ansamblul format din rezistența interioară și rezistența adițională a voltmetrului, pentru aceeași deviație maximă, la care însă corespunde o tensiune de n ori mai mare, adică:

$$I = \frac{nU}{r_g + R_{ad}}.$$

Prin egalarea celor două relații, rezultă:

$$R_{ad} = (n - 1)\, r_g. \qquad (4.7)$$

În cele ce urmează se va ține seamă de clasificarea după principiul de funcționare, insistîndu-se mai mult asupra caracteristicilor principale ale voltmetrelor, funcționarea dispozitivelor de măsurare fiind asemănătoare cu cea a ampermetrelor. Detaliat se vor explica numai voltmetrele electrostatice și cele electronice.

Voltmetrul magnetoelectric poate fi folosit numai în curent continuu și are o scară de măsurare liniară. Consumul propriu este neglijabil de mic, avînd o rezistență interioară foarte mare, care, exprimată în raport cu indicația maximă a scării, poate atinge chiar* 50 000 Ω/V. De aceea se utilizează în laboratoare ca aparat de măsurare de mare precizie, mai ales ca milivoltmetru, putîndu-și extinde intervalul de măsurare cu ajutorul rezistențelor adiționale.

Voltmetrul magnetoelectric cu redresor este un aparat alimentat prin redresor, care poate fi utilizat atît în curent continuu, cît și în curent alternativ. În curent alternativ, indicațiile lui sînt direct proporționale cu valoarea medie a tensiunii măsurate; din această cauză, măsurările sînt admisibile din punctul de vedere al preciziei, numai în regim sinusoidal, pentru curenți nesinusoidali rezultatele fiind însoțite de anumite erori.

Voltmetrul electromagnetic poate fi folosit în curent continuu și în curent alternativ, pentru tensiuni nominale cuprinse între 15 și 600 V. Domeniul de măsurare poate fi extins prin utilizarea rezistențelor adiționale.

Indicațiile lui sînt influențate de temperatura mediului ambiant, deoarece rezistența bobinei aparatului de măsurare, confecționată din sîrmă subțire de cupru, constituie o parte însemnată din rezistența voltmetrului. Prin asigurarea unui raport anumit între rezistența bobinei și rezistența adițională,

* Acest indice de calitate — rezistența specifică — este la aparatele obișnuite de 1 000—5 000 Ω/V. Se observă că, cu cît acesta este mai mare, cu atît curentul absorbit este mai mic $\left[\text{de exemplu, } I_v = \frac{1}{1\,000} \ldots \frac{1}{5\,000}\,\mathrm{A}\left(\frac{\mathrm{V}}{\Omega}\right)\right]$.

această influență se compensează. În curent continuu, funcționarea aparatului de măsurare mai este influențată de histerezisul magnetic al miezului feromagnetic, dînd indicații mai mici sau mai mari decît cele reale, la creșterea, respectiv la scăderea curentului. În curent alternativ, erorile datorate histerezisului magnetic sînt neglijabile, însă apar erori determinate de curenții turbionari. Din aceste cauze, indicațiile în curent continuu diferă de cele în curent alternativ.

Consumul propriu al acestor aparate este relativ mare, crescînd cu limita maximă a domeniului de măsurare. Construcția lor este însă simplă, robustă și puțin costisitoare. Datorită acestui fapt, ele sînt mult utilizate ca voltmetre industriale, portative sau de tablou, pentru măsurări în care nu este necesară o precizie mare.

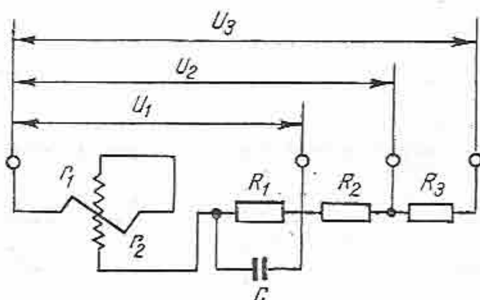


Fig. 4.9. Schema de conectare a voltmetrului electrodinamic cu mai multe domenii de măsurare.

Voltmetrul electrodinamic poate fi folosit în curent continuu și în curent alternativ, fiind construit, de obicei, cu rezistențe adiționale și cu mai multe limite de măsurare (fig. 4.9), cuprinse între 15 și 600 V. Este folosit aproape exclusiv ca aparat de laborator pentru măsurări de precizie.

Voltmetrul electrotermic (cu fir cald sau cu rezistență) poate fi folosit atît în curent continuu, cît și în curent alternativ. Indicațiile lui nu depind de frecvență și nu sînt influențate de cîmpurile magnetice exterioare, însă depind direct de variațiile de temperatură (pentru care însă se pot construi dispozitive de compensare). Se utilizează aproape exclusiv pentru măsurări de înaltă frecvență.

Voltmetrul cu termocuplu are un consum propriu foarte mic și nu este influențat de cîmpurile magnetice exterioare și de frecvența tensiunii de măsurat. Se folosește pentru măsurarea tensiunilor de joasă și înaltă frecvență.

Voltmetrul electrostatic funcționează după principiul expus în capitolul 3. Cele cu dispozitive de măsurare cu suprafața activă a armăturilor variabile se folosesc de obicei pentru măsurarea tensiunilor joase (între 20 și 2 500 V), iar cele cu distanța dintre armături variabilă se folosesc pentru măsurarea tensiunilor înalte (pînă la 30 kV). În cazul în care armăturile se introduc într-un dielectric (ulei sau gaz comprimat), limita de măsurare se poate extinde pînă la 150—180 kV.

Prin utilizarea unor mijloace tehnice speciale se poate extinde domeniul de măsurare al voltmetrelor electrostatice pînă la 500 kV. Dintre aceste mijloace se menționează:

— montarea în serie cu voltmetrul electrostatic a unor condensatoare adiționale C_a, ca în figura 4.10, *a*;

— utilizarea divizoarelor de tensiune capacitive, ca în figura 4.10, *b*, care presupun un ansamblu de condensatoare (C_1, C_2) montate în serie, pe unul dintre ele fiind legat în paralel voltmetrul electrostatic V_e;

— utilizarea unor divizoare de tensiune rezistive în curent continuu.

În primul montaj (fig. 4.10, *a*), tensiunea de măsurat se distribuie între voltmetrul electrostatic și condensator, în raport invers cu capacitatea lor.

Într-adevăr, dacă se notează cu U_v şi U_a tensiunile repartizate pe voltmetru şi pe condensatorul adiţional, ţinîndu-se seamă de faptul că curentul care parcurge cele două capacităţi este acelaşi, se poate scrie:

$$U_v = \frac{I}{C_v\omega}; \quad U_a = \frac{I}{C_a\omega} \quad \text{şi} \quad U = U_a + U_v, \tag{4.8}$$

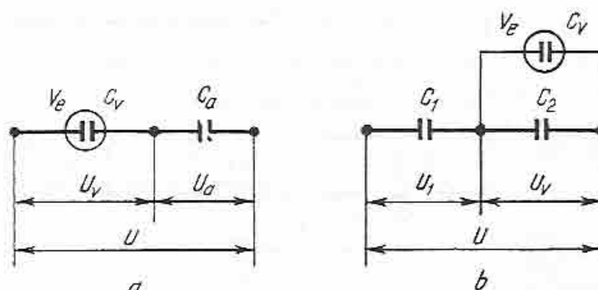


Fig. 4.10. Schema pentru extinderea domeniului de măsurare al voltmetrelor electrostatice: *a* — cu condensator adiţional; *b* — cu divizor de tensiune capacitiv.

de unde rezultă că:

$$\frac{U_v}{U_a} = \frac{C_a}{C_v} \tag{4.9}$$

şi

$$U = U_v \frac{C_a + C_v}{C_a}, \tag{4.10}$$

care arată că domeniul de măsurare a tensiunii cu voltmetrul electrostatic a crescut.

Se menţionează însă că aparatul trebuie să aibă scară gradată pentru fiecare condensator adiţional, adică pentru fiecare domeniu de măsurare.

În al doilea montaj (cu divizor de tensiune capacitiv — fig. 4.10, *b*) se pot scrie aceleaşi relaţii (4.8), ţinîndu-se seamă de faptul că în circuit există o capacitate înseriată cu alte două capacităţi în paralel. Rezultă:

$$U_1 = \frac{I}{C_1\omega}; \quad U_2 = U_v = \frac{I}{\omega(C_2 + C_v)}, \tag{4.11}$$

de unde:

$$U = U_1 + U_v = U_v \frac{C_1 + C_2 + C_v}{C_1}. \tag{4.12}$$

Cînd capacitatea C_1 este mult mai mare decît cea a voltmetrului C_v, atunci raportul $\frac{U}{U_v}$ rămîne practic constant pentru orice valoare a tensiunii de măsurat, şi deci aparatul poate avea o singură scară gradată pentru orice domeniu de măsurare.

Extinderea domeniului de măsurare cu ajutorul divizoarelor de tensiune rezistive pentru măsurări în curent continuu este limitată, datorită faptului că rezistenţele folosite au valori foarte mari, iar curenţii care trec prin voltmetrul electrostatic sînt foarte mici.

Indicațiile voltmetrului electrostatic sînt influențate, în mică măsură, doar de cîmpurile electrice exterioare. Cînd aparatul este bine ecranat electrostatic, atunci și aceste influențe se pot elimina.

Voltmetrul electronic. Voltmetrele obișnuite, descrise anterior, au în general rezistențe proprii ce nu depășesc 20 000 Ω/V. Aceasta înseamnă, de exemplu, că un astfel de voltmetru cu o scară de măsurare de 20 V are o rezistență internă:

$$R_V = 20\ \mathrm{V} \cdot 20\ 000\ \Omega/\mathrm{V} = 400\ 000\ \Omega = 400\ \mathrm{k}\Omega.$$

Se presupune că avem de măsurat căderea de tensiune de pe rezistența $R_2 = 400\ \mathrm{k}\Omega$ (fig. 4.11, *a*) în serie cu $R_1 = 200\ \mathrm{k}\Omega$ și alimentate de la sursa de tensiune $E = 30$ V. Se observă ușor că, datorită faptului că $R_2 = 2R_1$, potențialul punctului x este 20 V față de punctul $y = 0$ V. Așadar, căderea de tensiune reală pe rezistența R_2 este $U_2 = 20$V. Cu toate acestea, prin conectarea voltmetrului (fig. 4.11, *b*), circulația curenților prin montaj se schimbă astfel încît potențialul punctului x scade la 15 V ($U_2 = 15$ V). Este evident că o astfel de eroare de măsurare de 5 V ($\varepsilon = 33\%$) este inadmisibilă. Mai mult decît atît, dacă divizorul de tensiune R_1, R_2 este folosit, de exemplu, într-o schemă electronică cu tranzistoare, măsurarea cu ajutorul voltmetrului prezentat poate produce perturbații grave în montajul electronic respectiv. Situația este și mai grea în cazul folosirii unor astfel de voltmetre pentru măsurarea frecvențelor înalte utilizate în electronică, caz în care pot apărea erori mari de măsurare datorită reactanțelor inductive $L\omega$ și capacitive $\frac{1}{C\omega}$ ale înfășurărilor voltmetrului care se modifică odată cu modificarea frecvenței ($\omega = 2\pi f$).

Aceste inconveniente sînt eliminate prin realizarea unor voltmetre cu impedanță de intrare foarte mare și de reactanțe neglijabile. Soluția constructivă constă în folosirea unui instrument de măsurare obișnuit — un miliampermetru magnetoelectric cu performanțe ridicate (clasă de precizie și sensibilitate mari), conectat printr-un montaj de componente electronice, ansamblu ce poartă denumirea de *voltmetru electronic*.

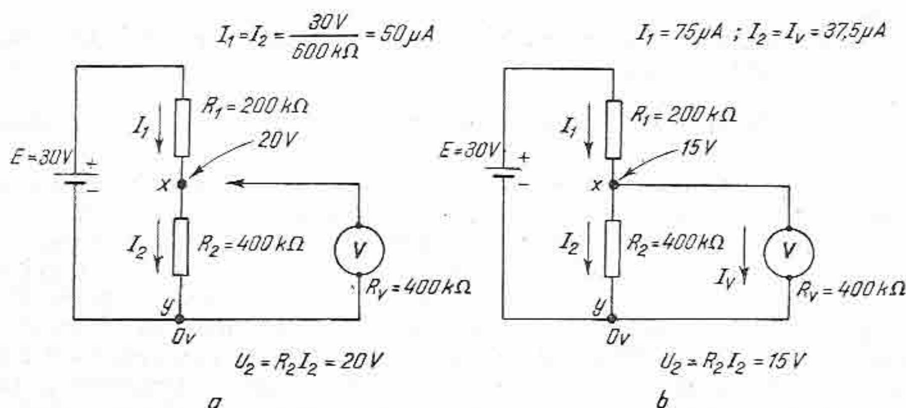


Fig. 4.11. Schema pentru măsurarea căderii de tensiune pe o rezistență.

Voltmetrul electronic de curent continuu. Cea mai simplă schemă de voltmetru electronic pentru curent continuu este reprezentată în figura 4.12, *a*. Comutatorul K fiind pe poziția *2*, se stabilește punctul de funcționare i (fig. 4.12, *b*) al triodei T printr-o negativare inițială αE_g a grilei tubului. În acest mod, cînd tensiunea de intrare este nulă ($U_i = 0$), tubul nu este complet blocat pentru a se evita funcționarea în porțiunea neliniară $b-i$ (tensiunea de

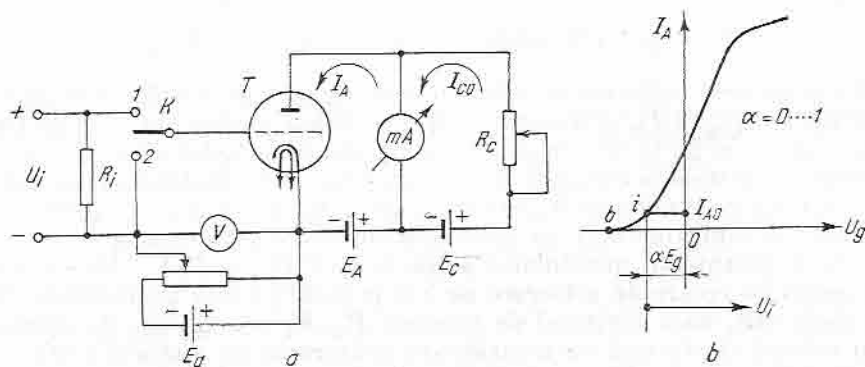


Fig. 4.12. Schema de principiu a voltmetrului electronic (*a*) și $I_a = f(U_g)$ (*b*).

negativare inițială αE_g este evident mai mică decît E_g întrucît $\alpha = 0 \dots 1$). În circuitul anodic al tubului T se introduce miliampermetrul magnetoelectric mA alimentat prin sursa E_A. Datorită faptului că în lipsa semnalului de intrare ($U_i = 0$) curentul anodic nu este zero (are valoarea I_{AO} — fig. 4.12, *b*), se prevede un circuit de compensare format din sursa de tensiune E_C și reostatul R_C care stabilește un curent de compensare $I_{CO} = -I_{AO}$, astfel încît, în starea inițială, indicația miliampermetrului este nulă. Măsurarea se efectuează cu comutatorul K pe poziția *1*, valoarea mărimii de măsurare U_i fiind astfel amplificată de către tubul T și materializată prin variația curentului anodic I_A care străbate miliampermetrul. Cu o etalonare corespunzătoare pe scara miliampermetrului se pot citi direct tensiunile măsurate. Montajul descris prezintă avantajul unei impedanțe de intrare mare, însă are și următoarele dezavantaje:

— necesitatea verificării poziției de zero înaintea fiecărei măsurări;

— neliniaritatea scării miliampermetrului din cauza neliniarității caracteristicilor tubului;

— apariția unor erori de măsurare din cauza variației în timp a pantei tubului.

Practic, se folosesc voltmetre electronice în punte avînd schemele din figura 4.13, *a* și *b* și care elimină aceste dezavantaje. Astfel, în lipsa mărimii de măsurare U_i (fig. 4.13, *a*), rezistențele R_1, R_2, R_3, împreună cu rezistența internă R_T a triodei T, formează o punte Wheatstone la echilibru. Prin varierea mărimii de măsurat U_i, rezistența R_T se modifică și, ca efect, puntea se dezechilibrează modificînd curentul I_A din diagonala punții. Se observă că valoarea curentului I_A depinde nu numai de valoarea rezistenței R_T, deci de tensiunea U_i, ci și de valoarea tensiunii de alimentare E_A, fapt care impune să se folosească o sursă E_A de tensiune stabilizată. Dacă în locul rezistorului R_3 se introduce un tub T_2 identic cu T_1, se obține mon-

tajul simetric din figura 4.13, *b*, care este insensibil la variațiile tensiunii E_A. Deoarece tuburile T_1 și T_2 sînt identice și lucrează în condiții identice, parametrii lor se modifică cu timpul în același mod, astfel încît voltmetrul este foarte stabil și după îmbătrînirea tuburilor.

Voltmetrul electronic de curent alternativ. Principiul voltmetrelor electronice de curent alternativ constă în transformarea tensiunilor alternative în tensiuni

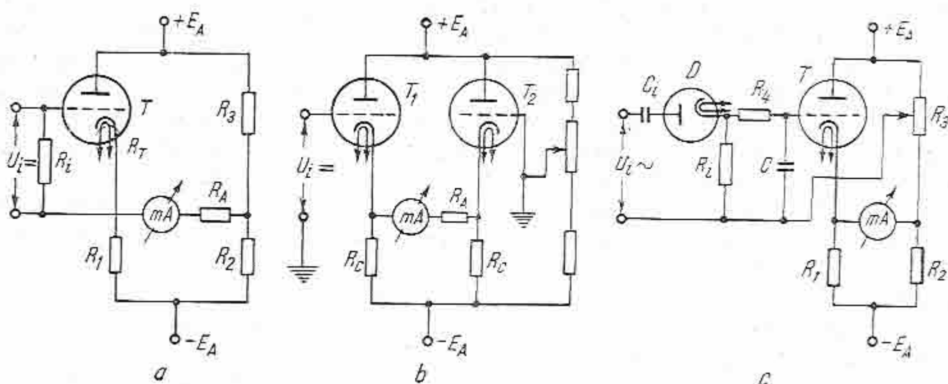


Fig. 4.13. Scheme ale voltmetrului electronic în punte:
a și *b* — pentru curent continuu; *c* — pentru curent alternativ.

continue, care apoi sînt măsurate cu voltmetrele electronice de curent continuu descrise mai sus. După regimul de funcționare al sistemului de redresare (detecție), voltmetrele electronice pot fi cu funcționare în clasele: A-B, B sau C. În clasele A-B, variația curentului anodic rezultă $I_A = KU_i^2$, astfel încît indicațiile miliampermetrului sînt proporționale cu pătratul valorii eficace a tensiunii măsurate. Componenta medie a curentului anodic în clasa B este proporțională cu valoarea medie a tensiunii de măsurare (prin detecție se asigură redresarea numai a alternanțelor pozitive), iar în clasa C — cu valoarea de vîrf a tensiunii măsurate.

În figura 4.13, *c* este reprezentată schema de principiu a unui voltmetru electronic de curent alternativ cu diodă de detecție funcționînd în clasa B și cu amplificator de curent continuu. Tensiunea alternativă de măsurat U_i este redresată monoalternanță prin dioda *D* care asigură o tensiune continuă (pulsatorie) pe rezistența R_i. Amplificarea și deci procesul de măsurare se realizează mai departe ca în figura 4.13, *a* sau *b*.

D. GALVANOMETRE

Curenții și tensiunile foarte mici, de ordinul microamperilor, microvolților sau chiar mai mici, se măsoară cu aparate foarte sensibile, numite galvanometre. Ele se construiesc de diverse tipuri, dintre care se vor analiza galvanometrul magnetoelectric cu bobină mobilă și galvanometrul de rezonanță.

1. GALVANOMETRUL MAGNETOELECTRIC CU BOBINĂ MOBILĂ

Acest aparat este construit după principiul general al aparatelor magnetoelectrice. În figura 4.14 este reprezentat un astfel de galvanometru de mare sensibilitate, cu suspensie liberă, cu indicator cu oglindă, spot luminos și riglă gradată exterioară. De firul de torsiune *1* sînt suspendate oglinda *2* și bobina mobilă *3*, care se poate roti în jurul miezului cilindric *4*, situat între polii magnetului permanent *5*. Firul de suspensie este așezat într-un tub de protecție *6* și prins cu capătul său superior de șurubul corector *7*. El servește la crearea cuplului rezistent și aducerea curentului la bobina mobilă. Conductorul de ieșire *8*, confecționat din aur sau din argint, se buclează pentru a nu influența mișcarea sistemului mobil.

Funcționarea galvanometrului are loc astfel: la închiderea întreruptorului din latura circuitului de măsurare în care se află conectat galvanometrul, echipajul mobil al acestuia se pune în mișcare, oprindu-se într-o nouă poziție de echilibru, corespunzătoare egalității dintre cuplul activ și cuplul rezistent. Oprirea în poziția de echilibru se face fie printr-o serie de oscilații amortizate, fie printr-o singură oscilație. Primul caz are loc cînd galvanometrul este închis pe o rezistență exterioară mare. Micșorîndu-se rezistența exterioară, gradul de amortizare a mișcării crește, iar durata oscilațiilor scade. Cînd rezistența exterioară scade sub o anumită valoare, numită rezistență critică, echipajul mobil se stabilizează printr-o singură oscilație, după o mișcare aperiodică. Pentru rapiditatea echilibrării galvanometrului, se recomandă ca acesta să funcționeze în regimul de mișcare aperiodică critică.

Caracteristicile principale ale galvanometrului sînt: sensibilitatea lui de curent și sensibilitatea de tensiune.

Sensibilitatea de curent S_I reprezintă raportul dintre deviația echipajului mobil, măsurată în diviziuni ale scării interioare (sau în milimetri, pe rigla

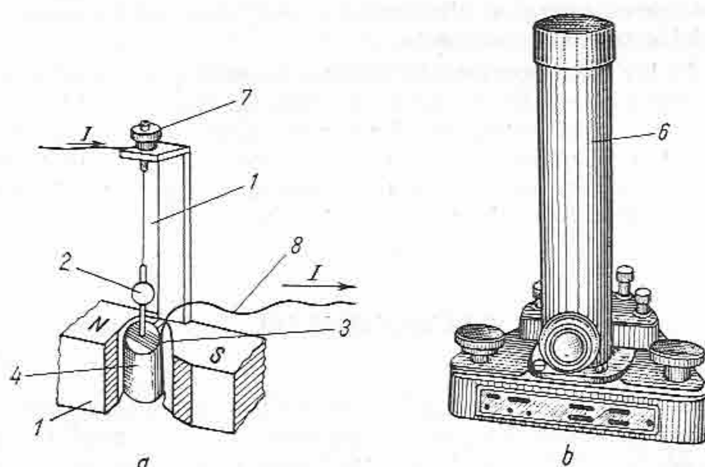


Fig. 4.14. Schema de principiu a galvanometrului magnetoelectric cu bobină mobilă (*a*) și aspectul exterior (*b*).

gradată aflată la distanța de 1 m de oglindă la galvanometrele cu riglă exterioară) și curentul în bobina mobilă:

$$S_I = \frac{\alpha}{I}\left[\frac{\text{mm}}{\mu\text{A}}\right]. \qquad (4.13)$$

Uneori, caracteristica galvanometrelor se exprimă prin *constanta* lor *de curent*, care reprezintă mărimea inversă a sensibilității, adică:

$$C_I = \frac{1}{S_I} = \frac{I}{\alpha}\left[\frac{\mu\text{A}}{\text{mm}}\right]. \qquad (4.14)$$

Sensibilitatea de tensiune S_U reprezintă deviația echipajului mobil provocată prin aplicarea la bornele aparatului în serie, cu o rezistență egală cu rezistența critică exterioară, a unei tensiuni egale cu unitatea, de obicei 1 μV, adică:

$$S_U = \frac{\alpha}{U}\left[\frac{\text{mm}}{\mu\text{V}}\right]. \qquad (4.15)$$

Constanta de tensiune a galvanometrului reprezintă mărimea inversă a sensibilității acestuia, adică:

$$C_U = \frac{1}{S_U} = \frac{U}{\alpha}\left[\frac{\mu\text{V}}{\text{mm}}\right]. \qquad (4.16)$$

Cele două sensibilități de curent și de tensiune sînt legate prin relația:

$$S_U = \frac{\alpha}{IR_c} = \frac{S_I}{R_c} \qquad (4.17)$$

considerîndu-se U ca fiind căderea de tensiune la trecerea curentului I prin rezistența critică a circuitului în care este conectat galvanometrul.

Galvanometrele cu sensibilitate de curent mare au perioadă de oscilație și rezistență critică mare, iar sensibilitatea de tensiune mică. Cele cu sensibilitate de curent relativ mică și cu rezistența critică mică au sensibilitatea de tensiune relativ mare.

Extinderea domeniului de măsurare la acest galvanometru se realizează cu ajutorul șunturilor sau al rezistențelor adiționale.

2. GALVANOMETRUL DE REZONANȚĂ

Acest aparat, utilizat pentru măsurarea curenților alternativi, are un echipaj mobil cu moment de inerție foarte mic, astfel încît frecvența oscilațiilor sale proprii poate fi făcută egală cu cea a curentului de măsurat în bobină. Cînd cele două frecvențe devin egale, se realizează fenomenul de rezonanță, datorită căruia oscilațiile echipajului mobil ating amplitudinea maximă, ceea ce face ca sensibilitatea galvanometrului de rezonanță să fie foarte ridicată (10^7 ...10^8 mm/A).

Din punct de vedere constructiv se deosebesc următoarele tipuri de galvanometre cu rezonanță: cu bobină mobilă, cu plăcuță mobilă magnetizată și cu magnet mobil.

Galvanometrul de rezonanță cu bobină mobilă este asemănător galvanometrului de curent continuu, însă are bobina mobilă de formă alungită și îngustă, fără cadru, pentru ca momentul de inerție să fie foarte redus.

Galvanometrul de rezonanță cu plăcuță mobilă magnetizată are o construcție cum este cea reprezentată în figura 4.15. Electromagnetul *1*, alimentat în curent continuu, are fixate de polii lui electromagneții de formă specială *2* și *3*, prin care trece curentul alternativ de măsurat. Plăcuța *4*, din oțel moale, este suspendată pe două benzi tensionate și se află în întrefierul pieselor polare ale electromagneților de curent alternativ. Pe una dintre benzi este fixată oglinda *5* a indicatorului cu spot luminos.

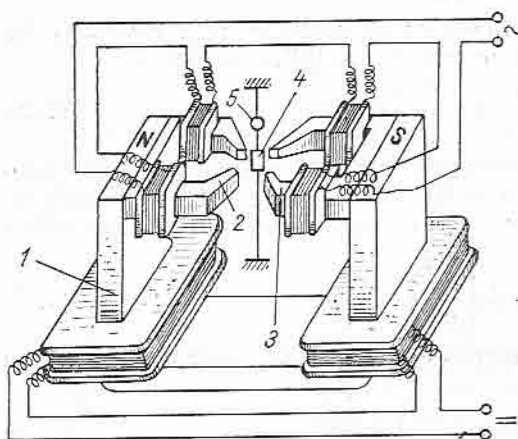


Fig. 4.15. Schema de principiu a galvanometrului de rezonanță cu plăcuță mobilă magnetizată.

Funcționarea galvanometrului are loc în felul următor: fluxul magnetic continuu, concentrat în întrefier asupra plăcuței *4*, datorită formei speciale a pieselor polare *2* și *3*, creează, împreună cu firele tensionate ale acesteia, cuplul rezistent. Cuplul activ este creat de fluxul magnetic alternativ al electromagneților respectivi, care este perpendicular pe fluxul continuu.

Cele două fluxuri, acționînd simultan asupra plăcuței *4*, fac ca poziția acesteia să fie determinată de fluxul rezultant. Deoarece unul dintre fluxuri este constant, iar celălalt variază periodic ca mărime și ca sens, fluxul rezultant va fi și el periodic și, ca urmare, plăcuța va oscila cu o frecvență egală cu cea a curentului alternativ de măsurat. Frecvența proprie a oscilațiilor libere ale plăcuței *4* poate fi modificată prin variația curentului continuu, adică a cuplului rezistent, pînă cînd ea devine egală cu frecvența curentului de măsurat. În acest moment, plăcuța intră în rezonanță mecanică, oscilînd cu o amplitudine maximă. Spotul luminos reflectat de oglinda galvanometrului descrie pe rigla gradată o bandă luminoasă, a cărei lățime este proporțională cu valoarea maximă a curentului de măsurat.

Aceste galvanometre au o sensibilitate mare și se construiesc pentru frecvențe de 25—100 Hz sau 400—1 000 Hz.

Galvanometrul de rezonanță cu magnet mobil are fluxul magnetic de curent continuu creat de un magnet permanent de dimensiuni foarte mici, suspendat pe benzi tensionate între polii unui electromagnet, ceea ce exclude necesitatea sursei de curent continuu. Funcționarea lui are loc ca și în cazul galvanometrului cu plăcuța mobilă. El are însă performanțe mai reduse, adică o sensibilitate de circa zece ori mai mică, iar gama de frecvențe la care se utilizează este de obicei 40—60 Hz.

3. GALVANOMETRUL BALISTIC

Pentru măsurarea cantităților de electricitate ale unor impulsuri de curent de scurtă durată se folosește galvanometrul balistic, aparat magnetoelectric caracterizat printr-o perioadă mare de oscilație a echipajului mobil și un moment de inerție mare.

În figura 4.16 este reprezentat principial sistemul mobil al galvanometrului balistic. Pentru mărirea momentului de inerție, de bobina mobilă *1* este legat un cilindru *2*. În cazul din figura 4.16, *b*, în locul cilindrului *2* s-au atașat echipajului mobil, ca greutăți suplimentare, două bile *4*.

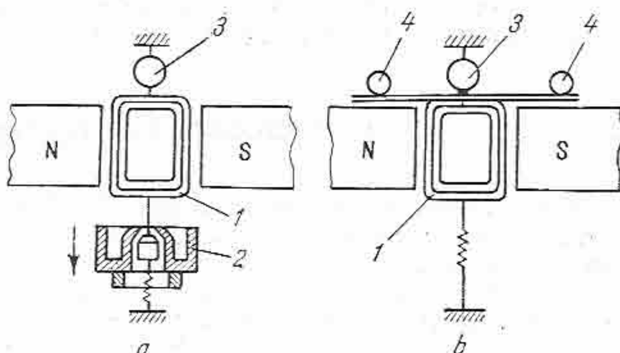


Fig. 4.16. Schema de principiu a galvanometrului balistic:
a — cu cilindru de inerție; *b* — cu bile de inerție.

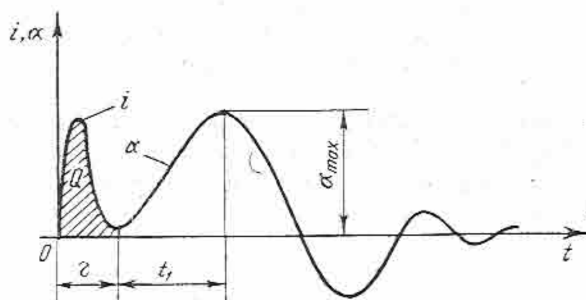


Fig. 4.17. Curbele impulsului de curent și ale deviației echipajului mobil al galvanometrului balistic.

La trecerea impulsului de curent prin galvanometru, sistemul mobil, deci și oglinda *3*, atinge o deviație maximă α_{max}, după care revine în poziția inițială (de zero) printr-o mișcare oscilatorie amortizată sau aperiodică. Dacă timpul t de trecere a impulsului de curent este mai mic decît perioada de oscilație a sistemului mobil al galvanometrului (fig. 4.17), atunci deviația maximă α_{max} este proporțională cu cantitatea de electricitate care trece prin bobină, adică:

$$Q = \int_0^t i \, dt = C_b \alpha_{max}, \tag{4.18}$$

de unde:

$$\alpha_{max} = \frac{Q}{C_b} \cdot \tag{4.19}$$

în care C_b reprezintă *constanta balistică* a galvanometrului. *Sensibilitatea* galvanometrului balistic este mărimea inversă constantei balistice și re-

prezintă deviația echipajului mobil la trecerea prin bobină a unei cantități de electricitate egală cu unitatea, adică:

$$S_b = \frac{\alpha_{max}}{Q} = \frac{1}{C_b}. \tag{4.20}$$

Modificarea sensibilității galvanometrului balistic se realizează, ca și în cazul galvanometrului cu bobină mobilă, prin șuntare.

E. OSCILOSCOPUL (oscilograful)

Osciloscopul este un aparat care permite observarea pe un ecran a formei curbei mărimilor variabile în timp, în general, a curenților și tensiunilor periodic alternative.

După principiul lor de funcționare, osciloscoapele se împart în două mari categorii, și anume: *osciloscoape electromecanice*, la care dispozitivul de măsurare are o anumită inerție, și *osciloscoapele electronice*, la care dispozitivul de măsurare nu are inerție.

Primul tip este utilizat la studierea mărimilor electrice care variază periodic, cu frecvențe joase pînă la 1—2 kHz, sau a mărimilor aperiodice, cu durată mai mare decît o milisecundă.

Cel de-al doilea tip este utilizat la studierea mărimilor electrice periodice care variază rapid în timp, cu frecvențe înalte pînă la cîțiva megaherți, sau a mărimilor aperiodice, cu durată pînă la fracțiuni de microsecundă.

Oscilograful este un osciloscop prevăzut cu dispozitiv de înregistrare fotografică a fenomenului.

1. OSCILOSCOPUL ELECTROMECANIC

Sistemul de măsurare al osciloscopului electromecanic poate fi construit după oricare dintre principiile pe care se bazează construcția aparatelor de măsurare. Dintre acestea, sistemul cel mai răspîndit corespunde aparatelor magnetoelectrice, avînd ca element de măsură *bucla osciloscopului*.

Bucla de măsură a osciloscopului (fig. 4.18, *a*) este confecționată dintr-o bandă de bronz *1*, bine întinsă, așezată între polii unui magnet permanent *2*. În mijlocul buclei se află lipită o oglindă minusculă *3*, a cărei suprafață este de aproximativ 1 mm². Întregul dispozitiv se introduce într-o cutie din material plastic (fig. 4.18, *b*), umplută cu ulei special, de obicei ulei de ricin, pentru a se elimina orice influență exterioară care ar putea produce vibrații parazite și denaturarea înregistrărilor.

Funcționarea buclei se bazează pe interacțiunea care are loc între curentul ce parcurge bucla și cîmpul magnetic al magnetului permanent. Curentul de înregistrat străbate cele două laturi ale buclei în sensuri contrare, astfel încît interacțiunea produsă între acesta și cîmpul magnetic este diferită. Cele două forțe egale și de semn contrar ce se exercită asupra laturilor buclei vor determina rotirea acesteia și, odată cu ea, a oglinzii, într-un sens oarecare, așa cum se observă în figura 4.19.

Dacă sensul curentului în buclă se modifică, atunci se va modifica şi sensul de rotire al acesteia.

Dacă bucla este parcursă de un curent alternativ, mişcarea ei se materializează printr-o puternică vibraţie, făcută vizibilă cu ajutorul unui fascicul de raze de lumină trimis printr-un sistem optic special * pe oglinda 3 (v. fig. 4.18) şi reflectat de aceasta pe un ecran.

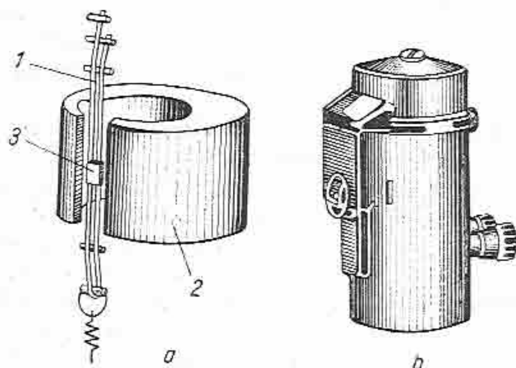


Fig. 4.18. Bucla de măsură a unui osciloscop electromecanic.

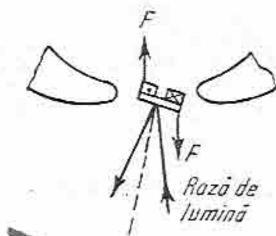


Fig. 4.19. Mişcarea buclei osciloscopului.

Cînd ecranul este constituit din hîrtie sau din peliculă fotografică şi se mişcă cu o viteză uniformă, printr-un dispozitiv oarecare, atunci spotul luminos va înscrie forma curbei mărimii electrice studiate. În figura 4.20 este reprezentată schematic funcţionarea oscilografului cu înregistrare pe bandă de hîrtie fotografică, unde *L*, *C*, *S* reprezintă sistemul optic care concentrează fasciculul de lumină pe oglinda *M*, de unde, printr-un alt sistem optic *Z*, este trimis pe pelicula *P*, care se deplasează cu viteză constantă. Curba *Q* materializează vizibil vibraţiile buclei.

Pentru ca fenomenul respectiv să poată fi studiat vizual (osciloscop), fasciculul luminos reflectat de oglinda buclei de măsurare este orientat către un tambur prismatic *T* (fig. 4.21), prevăzut cu oglinzi plane, care se roteşte proporţional cu turaţia de sincronism corespunzătoare fenomenului. De pe tamburul *T*, raza de lumină reflectată este trimisă pe un ecran de sticlă mată *E*, unde se vizualizează forma curbei mărimii variabile care se studiază.

Dacă bucla osciloscopului nu vibrează (intrarea este zero), dîra luminoasă care apare pe ecran este perpendiculară pe direcţia axei tamburului cu oglinzi şi reprezintă axa timpilor (axa absciselor) pe dia-

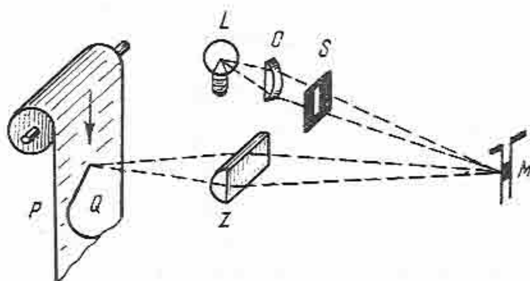


Fig. 4.20. Schema de principiu a oscilografului.

* Sistemul optic este format din lentile, prisme, diafragme, în scopul obţinerii unui fascicul de lumină cît mai subţire (focalizat).

grama respectivă; dacă însă tamburul cu oglinzi este imobil și bucla vibrează, imaginea de pe ecran este paralelă cu direcția axei tamburului cu oglinzi și constituie axa ordonatelor pe diagrama respectivă.

Cînd mișcarea aparatului este bine sincronizată cu mărimea variabilă, imaginea care apare pe ecran este fixă; în caz contrar, ea se deplasează de-a lungul axei absciselor într-un sens sau altul, după cum turația tamburului cu oglinzi este mai mare sau mai mică decît cea corespunzătoare vitezei de variație a fenomenului studiat. În acest mod este realizat osciloscopul electromecanic.

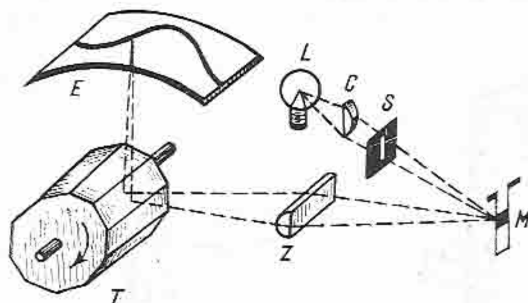


Fig. 4.21. Schema de principiu a osciloscopului.

În oscilografele moderne, cele două sisteme de observații sînt combinate, adică se înregistrează pe hîrtie fotografică și se vizualizează pe ecran ca în figura 4.22. Pe tamburul TK se înregistrează variația în timp a mărimii măsurate, iar pe ecranul E se vizualizează. Obișnuit, aceste oscilografe sînt realizate cu un număr mare de bucle de măsurare (3, 6 sau 8), cu ajutorul cărora se pot înregistra și observa simultan variația* mai multor mărimi electrice. În figura 4.23 este reprezentată schema unui oscilograf cu șase bucle. La aceste oscilografe, în afară de buclele de măsurare, mai există o buclă cu ajutorul căreia se determină scara timpilor și care pe peliculă înregistrează o curbă auxiliară cu perioadă cunoscută („baza de timp").

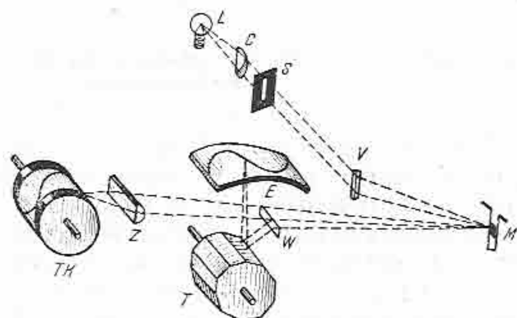


Fig. 4.22. Schema de principiu a oscilografului electromecanic universal.

Amplitudinea oscilațiilor buclelor de măsurare este proporțională cu mărimea curentului ce le străbate care, în general, trebuie să nu depășească 100 mA. Dacă curenții de măsurat sînt mai intenși, atunci alimentarea buclelor se face prin intermediul unui șunt sau chiar printr-un transformator de măsurare.

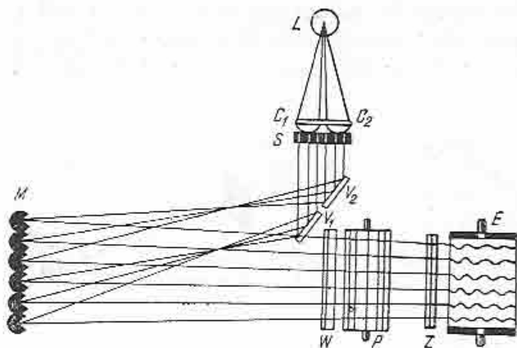


Fig. 4.23. Schema de principiu a unui oscilograf cu șase bucle de măsurare.

* În acest mod se pot observa (înregistra) atît variația în timp a unor mărimi electrice, cît și defazajele dintre ele.

Cînd trebuie să se oscilografieze tensiuni, în serie cu buclele de măsurare se conectează rezistențe adiționale neinductive, asemănătoare celor din cazul voltmetrelor.

Pentru înregistrarea puterilor instantanee s-au construit bucle de măsurare speciale. În figura 4.24 este reprezentată o astfel de buclă, la care magnetul permanent din cazul studiat este înlocuit cu un electromagnet, al cărui bobinaj constituie circuitul de curent al buclei de măsurare, fiind construit pentru a putea suporta un curent nominal de 5 A. El se poate conecta și la secundarul unui transformator de măsurare de curent. Bucla propriu-zisă este străbătută de un curent proporțional cu tensiunea de la bornele circuitului la care se înregistrează curba puterii instantanee.

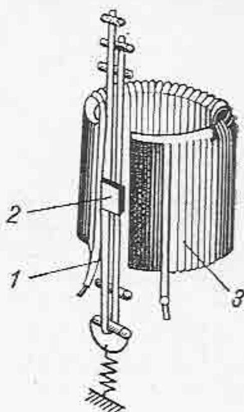


Fig. 4.24. Buclă pentru măsurarea puterilor: 1 — buclă; 2 — oglindă; 3 — bobine.

În măsurări de precizie, pentru a se evita influența transformatorului de măsurare, bucla de măsurare a puterilor se construiește cu bobina electromagnetului cu circuit de tensiune, legat la rețea, în serie cu o rezistență adițională neinductivă; bucla de măsurare propriu-zisă constituie elementul de curent, care se conectează la rețea prin intermediul unui șunt.

2. OSCILOSCOPUL ELECTRONIC (catodic)

Osciloscopul electronic, cunoscut sub denumirea generală de osciloscop catodic, are următorul principiu de funcționare: aplicîndu-se o tensiune continuă între doi electrozi, un catod și un anod, situați într-un tub în care s-a făcut un vid înaintat, va lua naștere un flux de electroni care, sub influența cîmpului electric aplicat, se va deplasa de la catod către anod. Viteza de deplasare va fi cu atît mai mare, cu cît diferența de potențial dintre cei doi electrozi va fi mai mare. Dacă anodul are o formă de disc, cu un orificiu circular central, atunci o parte din electroni vor scăpa prin acesta, propagîndu-se în linie dreaptă și constituind un fasciul de raze catodice. Cu ajutorul unor bobine speciale, fasciculul de electroni este astfel concentrat, încît să fie cît mai subțire.

Elementele descrise pînă aici, care asigură formarea unei raze electronice concentrate, constituie un *tun electronic* și el își găsește aplicație și în alte domenii; de exemplu, în televiziune, la realizarea tubului cinescop, în construcția distribuitoarelor electronice etc.

Căzînd asupra unui ecran acoperit cu o substanță luminescentă, fasciculul de electroni provoacă apariția pe acesta a unei pete luminoase, care se observă cu ochiul liber prin partea opusă a ecranului. Dacă se îndepărtează ecranul, cu un mijloc de acționare specială din exterior, electronii vor ajunge pe o hîrtie fotosensibilă, așezată într-o cameră fotografică imediat după ecran și, bombardînd substanța fotosensibilă, o vor impresiona.

Fasciculul de electroni poate fi deviat din drumul său în două direcții perpendiculare între ele, cu ajutorul unor cîmpuri electrice sau magnetice produse de dispozitive speciale. Astfel, folosindu-se condensatoare plan paralele (cîmp electric) sau bobine de deflexie (cîmp magnetic), raza electronică poate fi deviată, de exemplu pe verticală, proporțional cu mărimea de măsurat, și pe orizontală, cu o viteză constantă în timp, lucru realizabil cu

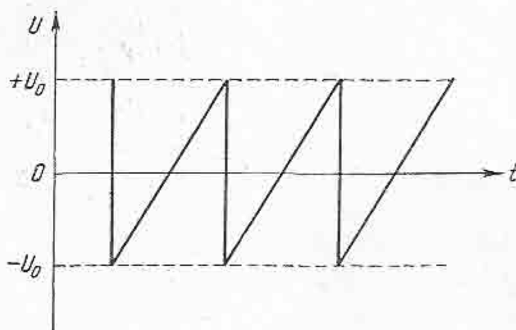


Fig. 4.25. Tensiune în dinte de ferăstrău.

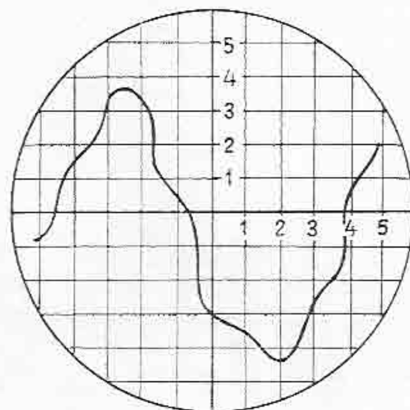


Fig. 4.26. Vizualizarea mărimii măsurate pe ecranul osciloscopului.

ajutorul unei tensiuni alternative în „dinți de ferăstrău" (fig. 4.25), constituind „baza de timp". Datorită faptului că această tensiune variază continuu și liniar de la valoarea $-U_0$ la $+U_0$ și apoi instantaneu de la $+U_0$ la $-U_0$, punctul luminos se va deplasa pe ecran cu viteză constantă de la stînga la dreapta ecranului, apoi brusc va reveni la stînga ecranului, perioada fiind reluată. În acest mod, în lipsa mărimii de măsurat pe ecranul osciloscopului va apărea o linie orizontală. Dacă valorile tensiunilor aplicate acestor dispozitive variază simultan în timp, fasciculul va descrie în planul ecranului o curbă ale cărei ordonate, într-un sistem de coordonate rectangulare, sînt proporționale cu valorile instantanee ale mărimii de măsurat și ale cărei abscise sînt proporționale cu timpul (fig. 4.26).

În tehnica măsurărilor osciloscoapele catodice folosite sînt: cu catod rece și cu catod cald.

Osciloscopul catodic cu catod rece se utilizează ca aparat industrial pentru vizualizarea fenomenelor tranzitorii și ultrarapide. Cu ajutorul lui se pot face și înregistrări (oscilograf) în încercările cu undă de șoc la cabluri, la izolatoare, la transformatoare, la mașini electrice, fenomene de trăsnet etc.

Producerea fluxului de electroni la acest tip de oscilograf catodic are loc numai ca urmare a acțiunii cîmpului electric care rezultă din aplicarea unei tensiuni continue între catod și anod. Schema lui de principiu este reprezentată în figura 4.27, iar principiul de funcționare este următorul: curentul electronic se formează ca urmare a unei acțiuni luminescente în tubul cu descărcare *2*. Sub acțiunea tensiunii înalte U (de 50—80 kV), aplicată între catodul *1* și anodul *4*, ionii pozitivi, care există în tubul *2*, se îndreaptă

spre catod și, bombardîndu-l, eliberează electroni de pe stratul superficial al catodului (emisiune autoelectronică).

Fasciculul de electroni *18*, concentrat cu ajutorul bobinei *3*, trece prin orificiile *5* și *8* și, căzînd asupra ecranului *15*, acoperit cu o substanță luminescentă, provoacă apariția pe acesta a unei pete luminoase, care este observată prin fereastra *16* a cuvei de oțel *17*. Dacă se îndepărtează ecranul,

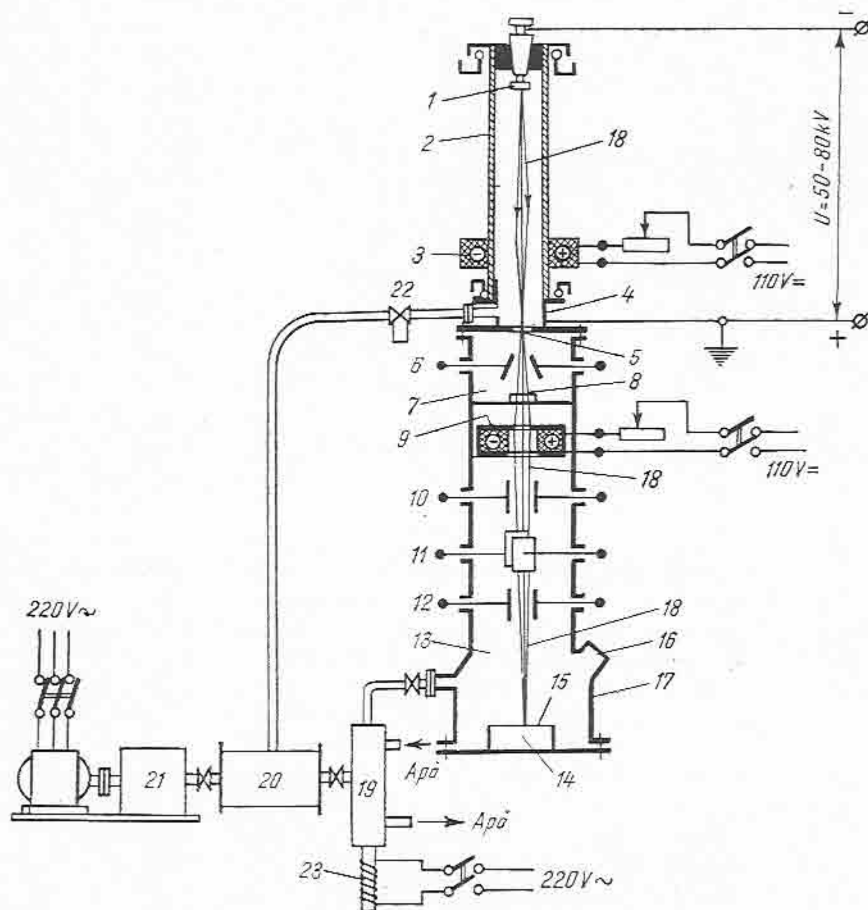


Fig. 4.27. Schema de construcție a oscilografului catodic cu catod rece.

cu un dispozitiv de acționare din exterior, fasciculul de electroni va ajunge pe o hîrtie fotosensibilă (fotografică), așezată în camera fotografică *14* imediat după ecran și, bombardînd-o, o va impresiona. Sub acțiunea tensiunilor aplicate plăcilor *11* și *12*, situate perpendicular una față de alta, fasciculul de electroni este deviat în două direcții perpendiculare între ele. Dacă cele două tensiuni variază în timp, fasciculul va descrie în planul ecranului o curbă ale cărei ordonate, într-un sistem de coordonate rectangulare, sînt proporționale cu valorile instantanee ale tensiunii plăcilor *11* și ale cărei

abscise sînt proporționale cu valorile instantanee ale tensiunii plăcilor *12*. Plăcile *11* se numesc *plăci de deviație* sau plăci ale fenomenului e studiat, iar plăcile *12* — *plăci ale bazei de timp*.

Pentru a se evita luminarea continuă a plăcii fotosensibile, fasciculul electronic trebuie să nu cadă pe ecran un timp îndelungat. Fasciculul trebuie să fie în mod normal „zăvorît" și „deschis" numai în timpul fotografierii fenomenului, într-un interval de timp care depășește puțin durata de parcurs a razei în lungul ecranului. Raza trebuie să fie deviată în prealabil dincolo de limitele ecranului, ceea ce se realizează prin aplicarea unei tensiuni de decalare pe plăcile bazei de timp; ea trebuie „să se deschidă" după începerea desfășurării fenomenului de studiat.

Dacă tensiunea acceleratoare este aplicată pe electrozii tubului de descărcare un timp îndelungat, zăvorîrea razei se efectuează în camera *7*. Pe plăcile *6* se aplică o tensiune continuă, care deviază lateral raza electronică din dreptul orificiului *8*. În timpul fotografierii se îndepărtează tensiunea de pe plăcile *6* și raza, nemaifiind deviată, trece prin orificiul *8* în camera *13*.

La unele tipuri de osciloscoape, devierea prealabilă se efectuează cu ajutorul unui condensator de deflexie *10*, separat de plăcile *12* care asigură numai baza de timp.

Pentru obținerea unei oscilograme clare, diametrul spotului pe ecran trebuie să fie cît se poate de mic (sub 1 mm), ceea ce se realizează cu ajutorul diafragmei anodice cu orificiul îngust *5* și al bobinei de focalizare *9*. Fasciculul electronic divergent, radiat prin orificiul *5*, este focalizat în planul ecranului sub acțiunea cîmpului magnetic cu simetrie axială al bobinei *9*.

Fasciculul electronic produs de catod trebuie să fie stabil. Stabilitatea este posibilă numai dacă presiunea din tubul de descărcare este menținută între anumite limite care depind de valoarea tensiunii aplicate, de dimensiunile și de forma tubului de descărcare, precum și de natura gazului din tub. La osciloscoapele moderne, pentru umplerea tuburilor se folosește aerul, iar pentru menținerea presiunii necesare (de obicei aproximativ 10^{-2} torr)* se folosește supapa de laminare *22*, care face legătura între spațiul de descărcare și atmosferă sau o cuvă de rarefiere prealabilă *20* a instalației de pompare *21*.

În camerele de zăvorîre *7* și în cea de deviere *13* trebuie să existe o presiune foarte scăzută (10^{-6} torr), pentru ca rigiditatea dielectrică să fie suficient de ridicată. Vidul înaintat din camera de deviere *13* are și rolul de a evita formarea în calea fasciculului electronic a unor sarcini spațiale care ar putea să exercite o acțiune de dispersare (deviere) a fasciculului, la deplasările transversale rapide ale acestuia. De aceea, pentru a se crea și a se menține vidul în această cameră de deviere, se folosește pompa de difuziune de vid înaintat *19*, cu mercur sau cu ulei.

Osciloscopul descris are un singur fascicul electronic și, ca urmare, nu poate înregistra decît un singur fenomen. Necesitatea înscrierii simultane pe același ecran a mai multor fenomene care au o bază de timp comună (de exemplu, tensiunea și curentul) a condus la crearea osciloscoapelor cu două sau cu mai multe fascicule electronice, care nu se deosebesc, principial,

---

* Torrul este o unitate de măsură tolerată egală cu 1 mm Hg

de cel descris mai sus. Fasciculele se obțin cu ajutorul mai multor tuburi de descărcare independente sau al unui tub comun, cu un număr corespunzător de catozi și de orificii dispuse pe diafragma anodică. Sistemul de focalizare, plăcile bazei de timp și ecranul sînt comune pentru toate fasciculele, însă fiecare fascicul își are plăcile proprii de deflexie ale mărimii de studiat.

Osciloscopul catodic cu catod cald (incandescent) are fasciculul de electroni creați nu prin bombardarea catodului cu ioni, ci prin emisiune termoelectronică. Sub acțiunea temperaturii înalte, catodul incandescent emite electroni și formează în apropierea lui o sarcină spațială, numită „nor electronic". Din acest nor, cîmpul electric accelerator își creează fluxul de electroni.

Catodul este format dintr-un cilindru de nichel, acoperit cu un strat de oxid de bariu. Încălzirea se face printr-o spirală de wolfram alimentată cu curent electric și acoperită cu o masă izolantă, și care este introdusă în cilindrul de nichel.

Construcția de principiu a unui tub catodic utilizat la osciloscoapele cu catod cald este reprezentată în figura 4.28, la care focalizarea se face în două trepte. Prin aceasta se obține un spot luminos de dimensiuni foarte reduse, și deci o densitate mare a fluxului electronic.

În balonul de sticlă, care are un vid foarte înaintat (10^{-6} torr), se găsesc:

— sistemul de emisie, format din catodul cu oxid K, încălzit electric, modulatorul M sau electrodul de comandă, de forma unui cilindru cu un orificiu cu diametrul de circa 1 mm, anodul A_1, de forma unui disc plat cu un orificiu cu diametrul de circa 2 mm, și anodul A_2, de forma unui cilindru cu un orificiu cu diametrul de circa 1 mm;

— „lentila" principală, formată de cîmpul electric dintre anozii A_2 și A_3 (cilindru cu orificiu circular);

— plăcile de deviere sau plăcile fenomenului de studiat (PF) și plăcile bazei de timp (PT);

— diafragma D_1 cu un orificiu rotund, care limitează fasciculul de electroni și diafragma D_2, cu fantă dreptunghiulară, care slăbește influența electromagnetică reciprocă a cîmpurilor plăcilor;

— ecranul luminescent E.

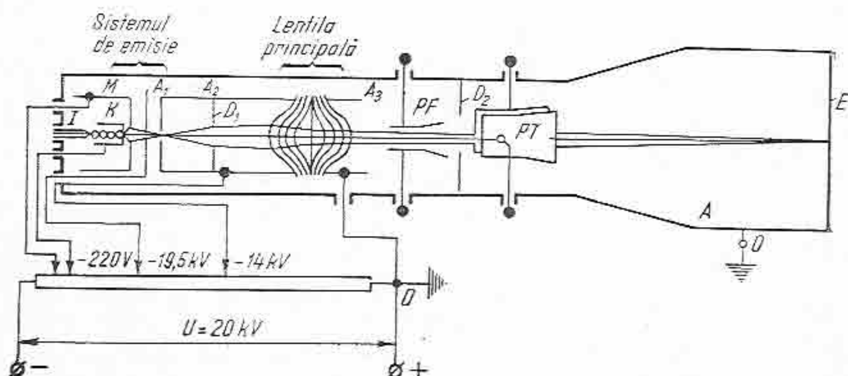


Fig. 4.28. Schema de principiu a unui tub catodic cu o tensiune de accelerare de 20 kV.

Cîmpul electric accelerator cu simetrie axială format între electrozii K, M, A_1 și A_2 accelerează electronii și focalizează fluxul electronic în apropierea orificiului din electrodul A_2.

Între electrozii A_2 și A_3, fasciculul divergent de electroni este accelerat și din nou focalizat în planul ecranului luminescent.

Formarea imaginii pe ecran rezultă ca o acțiune combinată a celor două cîmpuri electrice create de PF și PT asupra fasciculului de electroni, care va face ca spotul să urmărească variația curbei mărimii studiate. Pe ecran, imaginea este stabilă, datorită inerției luminoase a ecranului.

Osciloscopul catodic cu catod cald se construiește, în general, cu plăci la care se aplică tensiunea de studiat și tensiunea bazei de timp. Pentru a se studia un curent pe osciloscop se trece curentul printr-o rezistență neinductivă bine cunoscută (etalon sau șunt) și se aplică osciloscopului tensiunea de la bornele acestei rezistențe.

Tuburile catodice se confecționează, în general, cu un singur catod și, din această cauză, nu se poate studia decît o singură mărime. Există însă tuburi și cu doi sau cu mai mulți catozi calzi, însă în acest caz construcția osciloscopului devine mai greoaie.

Pentru a se putea înregistra simultan două curbe cu un oscilograf obișnuit se utilizează un montaj special, numit comutator electronic, care ajută la alimentarea plăcilor de măsurare pe rînd, cu cele două tensiuni de studiat și care apar astfel în același timp pe ecran.

F. METODE DE MĂSURARE A TENSIUNII ȘI CURENTULUI

1. MĂSURAREA TENSIUNII

Măsurarea tensiunilor se efectuează prin diferite metode, care diferă după valoarea mărimii de măsurat și după precizia cu care trebuie efectuată această măsurare. Astfel, dacă într-un circuit valoarea curentului și a tensiunii se încadrează în scările de măsurare ale aparatelor, atunci se utilizează metodele de măsurare directă. În caz contrar, se utilizează măsurarea cu ajutorul transformatoarelor de măsură. De asemenea, dacă măsurarea se poate efectua cu un grad de precizie obișnuit, atunci se utilizează metodele industriale. Cînd însă este necesară o precizie foarte mare se utilizează metode speciale de măsurare.

Metoda industrială. Metoda industrială de măsurare a tensiunii folosește aparate obișnuite, în general, cu clase de precizie de 1—2,5. Aparatul folosit este un voltmetru care se leagă în paralel cu sarcina. Extinderea domeniului de măsurare se face cu ajutorul rezistențelor adiționale, iar precizia corespunde aparatului folosit.

Metodele de compensație. Metodele de compensație se utilizează pentru măsurarea cu mare precizie a tensiunilor electromotoare, a diferențelor de potențial și a curenților în circuite de curent continuu. Prin aceste metode, mărimea de măsurat este comparată nemijlocit cu mărimile fundamentale etalon. Astfel, la măsurarea tensiunilor electromotoare sau a tensiunilor,

acestea se compară cu căderea de tensiune produsă într-o rezistență de precizie de un curent auxiliar care circulă prin aceasta. În practică se utilizează două metode de compensație: de opoziție simplă și de opoziție prin substituție.

Metoda de opoziție simplă se realizează cu ajutorul montajului dat de figura 4.29, care este format din două circuite: circuitul principal, care conține tensiunea electromotoare de măsurat E_x, conectată în serie cu rezistența R, cunoscută, și circuitul de măsurare, format din etalonul de tensiune electromotoare E_0 (pilă Weston), aparatul indicator de zero G, de obicei un galvanometru cu magnet permanent, și rezistența de protecție R_1, care limitează curentul la valori admisibile pentru galvanometru și pentru elementul-etalon.

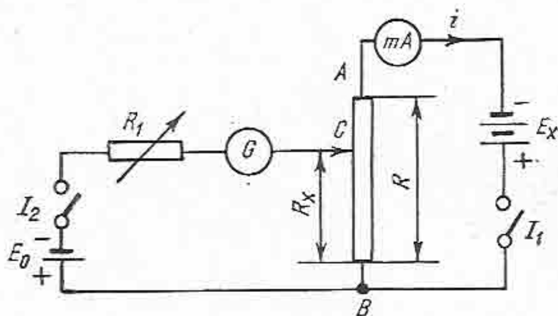


Fig. 4.29. Montajul pentru metoda de compensație de opoziție simplă pentru măsurarea tensiunilor electromotoare.

Elementul Weston se montează în opoziție cu sursa electrică de măsurat.

Modul de măsurare este următorul: se închide întreruptorul I_1, stabilindu-se în circuitul principal un curent constant $i = \frac{E_x}{R}$ (de ordinul $10^{-4} - 10^{-3}$ A), care poate fi măsurat cu miliampermetrul mA. Se închide apoi întreruptorul I_2 și se variază poziția cursorului C pînă cînd se echilibrează galvanometrul G. În acest moment, căderea de tensiune la bornele rezistenței R_x $(B-C)$ este egală cu tensiunea electromotoare a elementului normal, deci prin galvanometrul G nu trece curent.

Rezultă:

$$E_0 = R_x i = R_x \frac{E_x}{R},$$

de unde rezultă:

$$E_x = E_0 \frac{R}{R_x}. \tag{4.21}$$

Din această relație se observă că, deoarece raportul rezistențelor este întotdeauna supraunitar sau cel mult egal cu unitatea, prin această metodă nu se pot măsura diferențe de potențial mai mici decît tensiunea electromotoare a elementului normal.

Metoda de opoziție prin substituție permite și măsurarea tensiunilor electromotoare mai mici decît tensiunea elementului normal E_0. Montajul utilizat este cel din figura 4.30, care cuprinde următoarele elemente: elementul etalon E_0 (același ca și în metoda de opoziție simplă), tensiunea electromotoare măsurată E_x, tensiunea electromotoare auxiliară E, galvanometrul G, rezistența variabilă S, comutatorul K și întreruptorul I.

Modul de măsurare este următorul: se închide întreruptorul I, stabilindu-se prin rezistența R un curent i a cărui valoare este de 10^{-4}—10^{-3} A. Se pune comutatorul K pe poziția *1*, introducîndu-se elementul normal E_0

în circuit și apoi se variază rezistența R pînă cînd se echilibrează galvanometrul G. În acest moment, căderea de tensiune pe rezistența de echilibru este egală cu tensiunea electromotoare a elementului normal, adică:

$$E_0 = R_0 i. \tag{4.22}$$

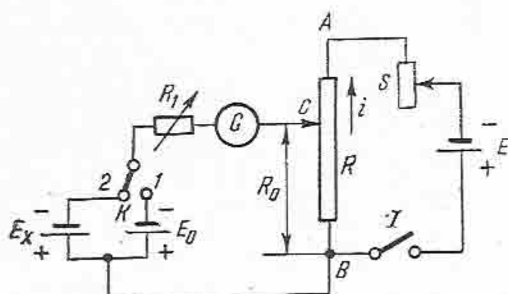


Fig. 4.30. Schema de montaj utilizată în metoda de opoziție prin substituție, pentru măsurarea tensiunilor electromotoare.

Se trece apoi comutatorul K pe poziția *2*, conectîndu-se în serie cu galvanometrul tensiunea electromotoare de măsurat E_x. Se variază poziția cursorului C al rezistenței R, pînă cînd se obține o nouă echilibrare a galvanometrului, pentru o altă valoare R_x a rezistenței. În acest moment, tensiunea electromotoare de măsurat este egală cu căderea de tensiune în rezistența R_x, adică:

$$E_x = R_x \cdot i. \tag{4.23}$$

Din aceste două relații rezultă prin împărțiri:

$$\frac{E_0}{E_x} = \frac{R_0}{R_x}, \tag{4.24}$$

de unde:

$$E_x = E_0 \frac{R_x}{R_0}. \tag{4.25}$$

În practică se aduc acestui mod de lucru modificări care simplifică măsurarea. În loc să se treacă prin rezistența R un curent i de o valoare oarecare, se stabilește un curent de valoare cunoscută de exemplu 10^{-3} A, printr-o operație preliminară, numită *tarare*. Operația de tarare se efectuează astfel: se fixează cursorul C astfel încît $R_0 = 1\,000\, E_0$ $\left(\text{pentru curentul ales de } \frac{1}{1\,000} \text{ A}\right)$. Se închide apoi circuitul principal (întreruptorul *I*) și se variază intensitatea curentului din acest circuit cu ajutorul rezistenței S, pînă cînd, introducîndu-se în circuitul de măsurare elementul normal E_0 (cu comutatorul K pe poziția *1*), se obține echilibrul galvanometrului. În acest moment, curentul din circuitul principal este de $\frac{1}{1\,000}$ A.

Ca și mai înainte, se trece comutatorul K pe poziția *2*, obținîndu-se echilibrarea pentru o rezistență oarecare R_x.

Deoarece prin tarare raportul $\frac{E_0}{R_0}$ este cunoscut $\left(\frac{E_0}{R_0} = \frac{1}{1\,000} \text{ A}\right)$, rezultă că valoarea tensiunii măsurate E_x va fi în acest caz:

$$E_x = \frac{R_x}{1\,000}. \tag{4.26}$$

Măsurarea tensiunilor înalte se poate efectua cu montajele de compensație descrise folosind divizoare de tensiune. În acest caz se conectează la bornele E_x ale circuitului de măsurare numai un procent stabilit din tensiunea

de măsurare. Pentru măsurare se utilizează divizoare de tensiune rezistive, cu rapoarte de reducere de: 10 : 1, 100 : 1 şi 1 000 : 1, a căror schemă este reprezentată în figura 4.31. Acestea sînt alcătuite dintr-o rezistenţă secţionată, de valoare mare (obişnuit 100 000 Ω), cu borne de ieşire separate pentru fiecare secţiune.

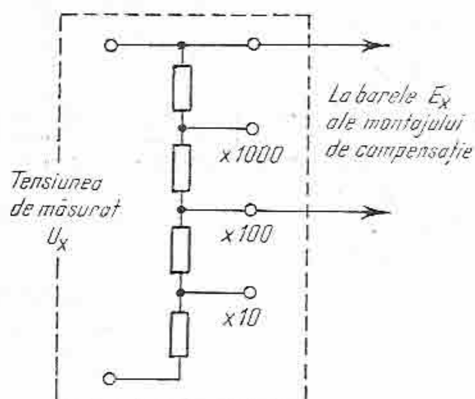


Fig. 4.31. Schema de montaj a divizorului de tensiune rezistiv, folosit în metodele de compensaţie.

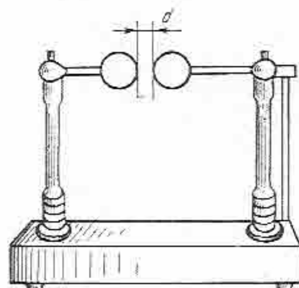


Fig. 4.32. Eclator cu sfere.

La bornele întregii rezistenţe se aplică tensiunea de măsurat U_x, iar la circuitul de măsurare se conectează numai anumite secţiuni în funcţie de raportul de reducere ales.

Metoda eclatorului. Eclatoarele sînt aparate utilizate pentru măsurarea valorii maxime a tensiunilor înalte, atît în curent continuu, cît şi în curent alternativ. Aparatul reprezentat în figura 4.32 se compune din două sfere de cupru sau de alamă cu acelaşi diametru, situate la o distanţă d, care se poate regla şi măsura cu o riglă gradată. Distanţa dintre sfere determină valoarea maximă a tensiunii de descărcare, care se citeşte direct pe rigla eclatorului, etalonată în kilovolţi, la temperatura de 20 °C şi la presiunea de 760 mm Hg.

Dacă măsurarea se face la presiuni şi la temperaturi diferite de cele de etalonare, se folosesc curbe de corecţie, care depind de tipul eclatorului.

Cu eclatoarele se pot măsura tensiuni cuprinse între 2 şi 2 500 kV, în funcţie de diametrul sferelor.

Măsurarea tensiunii cu transformatoare de măsurare. Această metodă se utilizează atunci cînd tensiunea măsurată este mai mare decît cea corespunzătoare indicaţiei maxime a voltmetrului. În acest scop, se utilizează transformatorul de măsurare de tensiune, la secundarul căruia se conectează un voltmetru, ca în figura 4.8, *c*. Dacă pe voltmetru se citeşte tensiunea U_2, iar raportul de transformare este K_u, tensiunea pe partea de înaltă tensiune (primară) este:

$$U_1 = K_u U_2. \tag{4.27}$$

Obişnuit, transformatoarele de măsurare de tensiune sînt destinate pentru reducerea tensiunilor alternative mai mari de 500 V, la tensiunea secundară standard de 100 V.

Metoda industrială. Măsurarea industrială a] curentului continuu sau alternativ se efectuează cu un ampermetru legat în serie pe circuit. În acest caz — datorită faptului că rezistența ampermetrului, deşi mică, nu este nulă

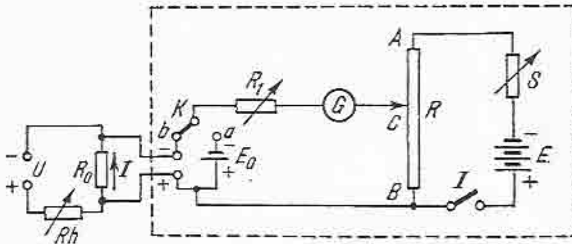


Fig. 4.33. Scheme de montaj pentru măsurarea curenților prin metoda de compensație.

— apare în ampermetru o pierdere de putere care modifică rezultatele, introducînd erori de măsurare. Acestea sînt cu atît mai mari cu cît rezistența circuitului de măsurare este mai mică. Precizia măsurărilor depinde de aparatul folosit.

Metoda de compensație. Această metodă se utilizează în laborator în scopul obținerii unor măsurări precise ale curentului. În acest caz, curentul se măsoară în mod indirect, printr-o măsurare de tensiune. În figura 4.33 este reprezentată schema de măsurare a curenților prin metoda de compensație, cu ajutorul căreia se măsoară căderea de tensiune U_x, la bornele rezistenței-etalon R_0, prin care circulă curentul de măsurat I_x. Curentul de măsurat rezultă din relația:

$$I_x = \frac{U_x}{R_0}. \tag{4.28}$$

Se observă că figura 4.33 corespunde figurii 4.30, în care, la bornele E_x ale circuitului de măsurare a fost conectată rezistența-etalon R_0, pe care se măsoară U.

Metoda galvanometrului. Curenții şi tensiunile foarte mici (pînă la 10^{-11} A) se pot măsura cu ajutorul galvanometrului. Dispozitivul indicator, format dintr-o mică oglindă lipită pe un fir de torsiune (v. subcapitolul D), reflectă o rază de lumină, trimițînd-o pe o riglă exterioară, gradată în milimetri, situată la distanța de 1 m (galvanometru de riglă gradată) sau pe un ecran prevăzut cu diviziuni (galvanometru cu cadran interior).

În figura 4.34 este indicat modul de amplasare a galvanometrului şi a riglei gradate. Razele de lumină emise de o lampă specială *1* trec prin orificiul *2* şi cad pe o oglindă din interiorul galvanometrului *3*. Aici se reflectă pe scara *4* a riglei gradate, sub forma unui spot luminos. Deviația de pe rigla gradată este proporțională cu deviația unghiulară a echipajului mobil, şi deci cu valoarea curentului (tensiunii) care trece prin galvanometru.

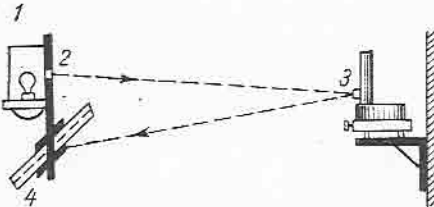


Fig. 4.34. Amplasarea galvanometrului.

Măsurarea curentului se realizează prin legarea galvanometrului în serie cu circuitul respectiv, ca și ampermetrul. Cînd aparatul nu este utilizat, se recomandă să se scurtcircuiteze bornele sale, pentru a se proteja sistemul mobil.

Măsurarea curentului cu transformatoare de măsurare. Cînd curentul măsurat este mai mare decît posibilitățile de măsurare ale ampermetrelor, precum și în cazul măsurării curenților de înaltă tensiune, se folosesc transformatoare de măsurare de curent. Ele reduc curenții alternativi de intensități mai mari decît 50 A la valori mici, de obicei 5 A (mai rar 1 A). În acest scop, transformatoarele de curent se construiesc cu foarte puține spire în înfășurarea primară și cu un număr mare de spire în înfășurarea secundară, astfel încît este satisfăcută relația:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{I_2}{I_1}. \tag{4.28}$$

Înfășurarea primară a transformatoarelor de curent se leagă în serie cu circuitul curentului care se măsoară, iar înfășurarea secundară se conectează în serie cu aparatele de măsurare.

Dacă în circuitul secundar se măsoară curentul I_2, iar raportul de transformare este K_i, curentul în circuitul primar are valoarea:

$$I_1 = K_i I_2. \tag{4.29}$$

Transformatoarele de măsurare de curent se construiesc fie ca transformatoare de uz industrial, fie ca transformatoare de laborator. Cele din prima categorie au de obicei un singur domeniu de măsurare, pe cînd cele din a doua categorie au mai multe.

REZUMAT

- Măsurarea curenților se realizează cu ajutorul *ampermetrelor*, extinderea domeniului de măsurare necesitînd *șunturi* (rezistențe în paralel cu ampermetrul).
- Conectarea ampermetrului se face *în serie* cu circuitul sarcinii.
- Măsurarea tensiunilor se realizează cu ajutorul *voltmetrelor*, extinderea domeniului de măsurare necesitînd *rezistențe adiționale* (în serie cu voltmetrul).
- Conectarea voltmetrului se face în *paralel (derivație)* cu circuitul sarcinii.
- Galvanometrul este folosit pentru măsurarea curenților sau a tensiunilor foarte mici.
- Osciloscopul (oscilograful) permite vizualizarea (înregistrarea) mărimilor electrice variabile în timp.

ÎNTREBĂRI RECAPITULATIVE

1. *Se poate măsura un curent cu ajutorul unui voltmetru și în ce mod?*
2. *Se poate măsura o tensiune cu ajutorul unui galvanometru și în ce mod?*
3. *Dintre șunturi și rezistențe adiționale care au valori mai mari și de ce?*
4. *Folosindu-se un voltmetru magnetoelectric se poate măsura o tensiune de înaltă frecvență?*

CAPITOLUL 5

MĂSURAREA REZISTENŢELOR

Măsurarea rezistenţelor electrice se poate efectua printr-o serie de metode care diferă după specificul şi mărimea rezistenţelor, precum şi după precizia şi aparatele de măsurat utilizate. Astfel, pentru rezistenţe a căror măsurare nu necesită o precizie deosebită, se pot aplica metodele industriale, în timp ce pentru rezistenţe de precizie se aplică metode de laborator (metode de punte sau metode de compensaţie).

În cele ce urmează se dezvoltă aceste metode ţinînd seamă de scopul urmărit prin măsurare şi de mărimea rezistenţelor de măsurat.

A. MĂSURAREA REZISTENŢELOR CU METODE INDUSTRIALE

Metodele industriale de măsurare a rezistenţelor se aplică în întreprinder constructoare, în ateliere, pe platforme industriale etc. şi utilizează instrumente de măsurare curente, ca ampermetre, voltmetre, ohmmetre şi rezistenţe-etalon. Dintre aceste metode se vor prezenta metoda ampermetrului şi a voltmetrului, metoda voltmetrului şi a rezistenţei-etalon sau metoda comparaţiei şi metoda ohmmetrului.

1. METODA AMPERMETRULUI ŞI A VOLTMETRULUI

Prin această metodă, valoarea rezistenţei de măsurat, R_x, se determină cu ajutorul legii lui Ohm $R_x = \frac{\Delta U_x}{I_x}$, în care ΔU_x este căderea de tensiune la bornele acesteia şi se măsoară cu un voltmetru, iar curentul I_x care o parcurge, cu un ampermetru. Legarea acestor aparate în schema de măsurare se poate face prin două montaje: montajul aval şi montajul amonte.

Montajul aval, reprezentat în figura 5.1, *a*, are voltmetrul conectat în derivaţie direct la bornele rezistenţei de măsurat, ceea ce face ca el să nu măsoare şi căderea de tensiune din rezistenţa ampermetrului.

Curentul măsurat de ampermetru reprezintă însă curentul total al schemei, format atît din curentul I_x, care parcurge rezistenţa, cît şi din curentul I_v, care parcurge rezistenţa voltmetrului.

Montajul amonte, reprezentat în figura 5.1, *b*, are voltmetrul conectat astfel încît acesta măsoară şi căderea de tensiune în ampermetru. Intensitatea curentului care parcurge rezistenţa R_x corespunde indicaţiei de măsurare date de ampermetru.

Valoarea efectivă a rezistenţei, în cazul în care se cunosc caracteristicile aparatelor de măsurare, se determină în cazul ambelor metode (aval sau amonte) folosindu-se legea lui Ohm. Astfel, din montajul aval rezultă:

$$R_x = \frac{\Delta U_x}{I_x} = \frac{U}{I - I_v} = \frac{U}{I - \frac{U}{R_v}} \tag{5.1}$$

în care R_v reprezintă rezistenţa voltmetrului.

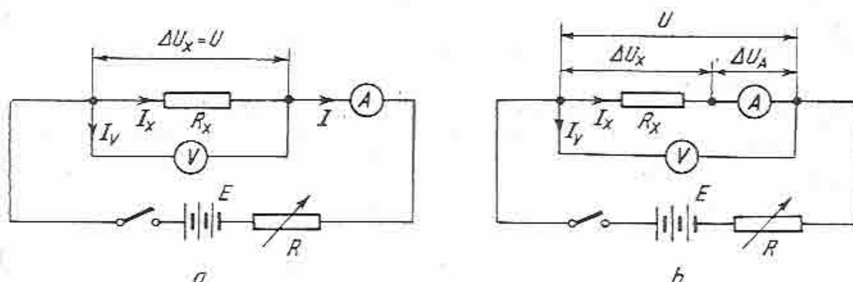


Fig. 5.1. Scheme pentru măsurarea rezistenţelor prin metoda ampermetrului şi a voltmetrului:

a — montajul aval; b — montajul amonte; R_x — rezistenţa de măsurat (necunoscută); R — rezistenţa reglabilă.

Din montajul amonte se obţine:

$$R_x = \frac{\Delta U_x}{I_x} = \frac{U - \Delta U_A}{I_x} = \frac{U - R_A I_X}{I_x} = \frac{U}{I_x} - R_A, \tag{5.2}$$

în care:

ΔU_A reprezintă căderea de tensiune în rezistenţa ampermetrului;
R_A — rezistenţa ampermetrului.

Dacă nu se cunosc caracteristicile aparatelor de măsurare, iar rezistenţa de măsurat se determină folosindu-se numai indicaţiile ampermetrului şi ale voltmetrului, atunci rezultatele obţinute conţin erori sistematice relative (de metodă).

Eroarea sistematică relativă în cazul montajului aval rezultă din relaţia generală:

$$\left(\frac{\Delta R}{R_x}\right)_m = \frac{R_m - R_x}{R_x}, \tag{5.3}$$

în care:

R_m reprezintă rezistenţa ce reiese din folosirea citirilor de pe aparatele de măsurare;
R_x — rezistenţa reală.

Ţinîndu-se seamă de faptul că:

$$R_m = \frac{U}{I_x + I_v}$$

şi

$$R_x = \frac{U}{I_x},$$

relația (5.3) devine

$$\left(\frac{\Delta R}{R_x}\right)_m = -\frac{I_v}{I_x + I_v} = -\frac{R_x}{R_x + R_v}, \tag{5.4}$$

care arată că eroarea sistematică este cu atît mai mică, cu cît rezistența de măsurat este mai mică în comparație cu rezistența voltmetrului. Ca urmare, montajul aval se va utiliza atunci cînd trebuie măsurate rezistențe mici (în general, de ordinul ohmilor sau chiar mai mici).

Eroarea sistematică relativă în cazul montajului amonte se determină folosindu-se aceeași relație generală (5.3), în care:

$$R_m = \frac{U}{I_x} \quad \text{și} \quad R_x = \frac{U - \Delta U_A}{I_x},$$

ΔU_A reprezentînd căderea de tensiune în rezistența ampermetrului.

Rezultă că:

$$\left(\frac{\Delta R}{R_x}\right)_m = \frac{\Delta U_A}{U - \Delta U_A} = \frac{R_A}{R_x}, \tag{5.5}$$

ceea ce arată că eroarea sistematică este cu atît mai mică cu cît rezistențele de măsurat sînt mai mari față de rezistența interioară a ampermetrului. Acest lucru scoate în evidență faptul că montajul amonte se va utiliza atunci cînd trebuie măsurate rezistențe mari (pînă la $10^6\ \Omega$ sau chiar mai mari).

2. METODA VOLTMETRULUI ȘI A REZISTENȚEI ETALON (metoda de comparație)

La această metodă se formează un circuit în care se leagă în serie cu rezistența necunoscută de măsurat R_x, o rezistență-etalon cunoscută R_0, ca în figura 5.2. Se măsoară succesiv, cu același voltmetru, tensiunea la bornele acestor rezistențe, curentul fiind menținut constant în circuit, în ambele cazuri.

Dacă cele două tensiuni măsurate sînt U_0 și U_x, atunci rezultă că:

$$R_0 = \frac{U_0}{I} \quad \text{și} \quad R_x = \frac{U_x}{I}$$

sau, prin împărțire:

$$\frac{R_x}{R_0} = \frac{U_x}{U_0},$$

de unde se deduce:

$$R_x = R_0 \frac{U_x}{U_0}. \tag{5.6}$$

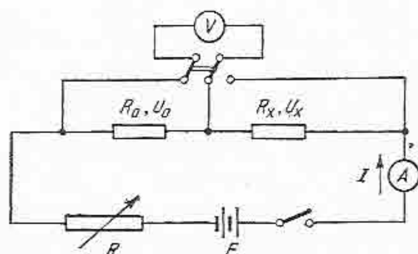


Fig. 5.2. Schemă pentru măsurarea rezistențelor prin metoda comparației.

Această metodă este cu atît mai exactă, cu cît rezistențele ce se compară au valori mai apropiate una de alta. Ea este indicată, în general, pentru măsurarea re-

zistenţelor mici ($R_x < 1\Omega$), putînd fi aplicată şi ca metodă de laborator, dacă se înlocuieşte voltmetrul cu un galvanometru sensibil, în serie cu o rezistenţă mare, de ordinul 10^4—10^6 Ω.

Dacă nu se dispune de rezistenţă-etalon, ci numai de un voltmetru cu rezistenţă interioară mare şi cunoscută, se poate folosi o baterie de acumulatoare bine încărcată.

Se măsoară cu ajutorul voltmetrului diferenţa de potenţial la bornele acumulatorului, obţinîndu-se o valoare oarecare U_1. Se leagă în serie cu voltmetrul un rezistor cu rezistenţă necunoscută R_x şi se măsoară din nou diferenţa de potenţial la bornele aceluiaşi acumulator, obţinîndu-se o altă valoare U_2.

Rezistenţa necunoscută se determină ţinîndu-se seamă de faptul că la prima măsurare mărimea U_1 este dată de relaţia:

$$U_1 = K\frac{E}{R_v} = Ki_1, \tag{5.7}$$

ar la cea de-a doua măsurare rezultă:

$$U_2 = K\frac{E}{R_v + R_x} = Ki_2, \tag{5.8}$$

în care:

K reprezintă constanta voltmetrului;
i_1 — curentul care parcurge voltmetrul;
i_2 — curentul la legarea în serie cu voltmetrul a rezistenţei R_x;
E — sursa electromotoare a montajului;
R_v — rezistenţa voltmetrului.

Împărţindu-se relaţia (5.7) prin (5.8), rezultă:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_v + R_x}{R_v} = 1 + \frac{R_x}{R_v},$$

de unde:

$$R_x = R_v\left(\frac{U_1}{U_2} - 1\right). \tag{5.9}$$

Cu această metodă, folosindu-se un acumulator de 4 V, pot fi măsurate rezistenţe cu valori cuprinse între 25 şi 50 000 Ω, iar cu un acumulator de 80 V, rezistenţe cu valori cuprinse între 2 000 şi 4 000 000 Ω.

3. METODA OHMMETRULUI

Ohmmetrele sînt aparate cu care se determină direct valoarea unei rezistenţe electrice. Ele se compun dintr-o sursă de curent continuu, care poate fi o baterie uscată sau un mic generator de curent continuu cu magnet permanent (magnetou), şi un aparat indicator magnetoelectric. Principiul lor de funcţionare se bazează pe aplicarea legii lui Ohm.

Din punct de vedere constructiv se deosebesc trei tipuri de ohmmetre: cu montaj şunt, cu montaj serie şi cu indicator (magnetou). La primele două

tipuri de ohmmetre, indicațiile depind de tensiunea sursei de alimentare, iar aparatul indicator este un aparat magnetoelectric obișnuit, care poate fi un ampermetru sau un galvanometru. Ele nu se deosebesc decît în ceea ce privește modul în care se leagă rezistența de măsurat la aparatul indicator.

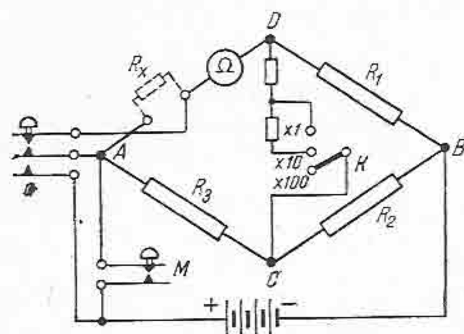


Fig. 5.3. Schema ohmmetrului cu montaj serie:
Ω — aparat indicator.

La al treilea tip de ohmmetru, indicațiile nu depind de tensiunea sursei de alimentare, iar aparatul indicator este construit după principiul logometrelor magnetoelectrice.

Ohmmetrul cu montaj serie are aparatul indicator conectat în serie cu rezistența de măsurat, ca în figura 5.3.

Acul ohmmetrului rămîne în poziția de repaus atunci cînd rezistența de măsurat are o valoare infinit de mare (adică atunci cînd la bornele aparatului nu există nici o rezistență). Acest punct este notat pe scara aparatului cu semnul ∞. Cînd rezistența de măsurat are valoarea zero, respectiv bornele aparatului sînt legate în scurtcircuit, acul indicator are cea mai mare deviație, care va fi notată cu zero (deci scara aparatului gradată în ohmi are sens invers).

Măsurarea rezistențelor se face în felul următor: se leagă rezistența de măsurat R_x la bornele ohmmetrului. Se apasă pe butonul M și se citește valoarea rezistenței direct pe aparatul indicator. Comutatorul K servește la schimbarea domeniului de măsurare, respectiv la schimbarea sensibilității aparatului.

Deoarece indicațiile aparatului pot varia în raport cu tensiunea la bornele sursei, el are prevăzut un dispozitiv de verificare a acesteia, care constă din măsurarea unei rezistențe cunoscute, montată chiar în aparat. Verificarea se face apăsîndu-se pe butonul P și observîndu-se dacă acul indicator se oprește în dreptul unei anumite diviziuni, marcată cu roșu pe scara aparatului. Dacă indicația nu este cea corectă, atunci se recomandă schimbarea bateriei sau modificarea rezistenței interioare a aparatului, cu ajutorul unui dispozitiv de corecție.

Domeniul de utilizare al ohmmetrelor cu montaj în serie corespunde rezistențelor mari.

Ohmmetrul cu montaj șunt are aparatul indicator conectat în paralel cu rezistența de măsurat, ca în figura 5.4. Spre deosebire de montajul serie, în acest caz acul indicator se află în poziția zero pe scară, cînd rezistența de măsurat este nulă (bornele aparatului sînt în scurtcircuit), și are deviația maximă, cînd rezistența de măsurat este infinită (R_x nu există la borne). În consecință, scara aparatului, gradată în ohmi, are sensul normal.

Măsurarea rezistențelor cu ajutorul ohmmetrului cu montaj șunt se efectuează în același mod ca și la montajul serie. Reglarea aparatului se face cu întreruptorul P deschis, aducîndu-se acul indicator la diviziunea ∞ a

scării, cu ajutorul șuntului magnetic al aparatului. Domeniul de utilizare al ohmmetrelor cu montaj șunt corespunde rezistențelor mici.

Ohmmetrul cu inductor (cu magnetou) are aparatul indicator de tipul logometrelor magnetoelectrice, iar sursa de alimentare este constituită dintr-un inductor, ca în figura 5.5. Echipajul mobil al logometrului, alcătuit din două bobine *1* și *2*, încrucișate la 90° și legate solidar, este situat între polii unui magnet permanent *N-S*. Bobinele sînt alimentate de curentul produs prin învîrtirea manivelei inductorului *MG*, legate în serie cu rezistențe de valori diferite, și anume, una dintre ele — cu rezistența necunoscută R_x, cealaltă — cu o rezistență de protecție R_p (fig. 5.5, *a*). Rezistența R_x se poate monta și în paralel cu una dintre bobine ca în figura 5.5, *b*.

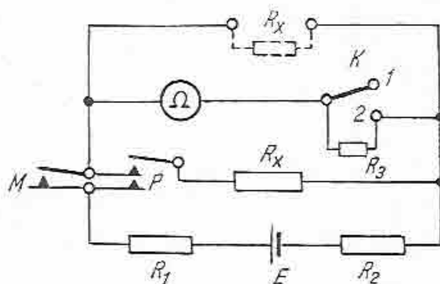


Fig. 5.4. Schema ohmmetrului cu montaj șunt:

R_1, R_2 — rezistențe de limitare a curentului; R_3 — rezistență pentru schimbarea domeniului de măsurare; *P* — comutator pentru verificare; Ω — aparatul indicator; *M* — buton de măsurare; *K* — comutator de schimbare a domeniului de măsurare.

După cum se știe (v. cap. 3, fig. 3.18), deviația logometrului este determinată de raportul intensităților curenților din cele două bobine. Deoarece ambii curenți sînt proporționali cu tensiunea sursei de alimentare, raportul lor este independent de aceasta, astfel încît se poate scrie că deviația α a echipajului mobil este:

$$\alpha = f_1\left(\frac{I_2}{I_1}\right) = f_2\left(\frac{R_1 + R_x}{R_2 + R_p}\right) = f_3(R_x), \qquad (5.10)$$

în care R_1 și R_2 reprezintă rezistențele celor două bobine.

Relația (5.10) arată că indicațiile ohmmetrului sînt funcție numai de rezistența de măsurat, fiind independente de tensiunea electromotoare a sursei, adică de viteza de rotație a manivelei inductorului. Ca urmare, aceste ohmmetre nu necesită nici o reglare prealabilă măsurării.

Schema ohmmetrelor cu inductor cu rezistență R_x în serie cu una dintre bobine se utilizează pentru măsurarea rezistențelor de valori ridicate, de ordinul megohmilor (de aceea, aparatele se mai numesc și megohmmetre); cele cu rezistența R_x în paralel cu una dintre bobine se utilizează pentru măsurarea rezistențelor de valori reduse.

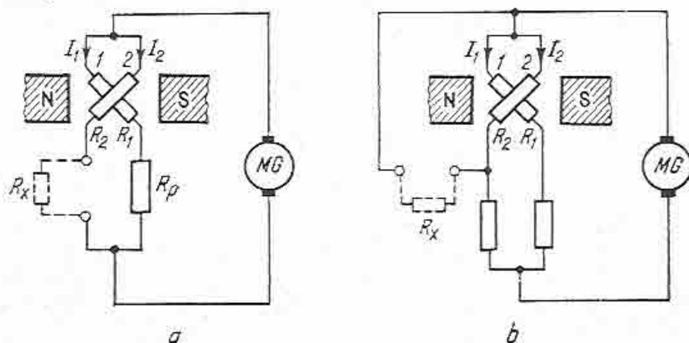


Fig. 5.5. Schema ohmmetrului cu inductor.

B. MĂSURAREA REZISTENȚELOR CU METODE DE LABORATOR

Metodele de laborator sînt metode de precizie, cu ajutorul cărora se pot măsura rezistențe de orice valori. Ele se aplică, mai ales, în laboratoarele sau în atelierele de montaj și de reparații de aparate electrice și folosesc montaje speciale. În cele ce urmează se vor dezvolta metodele cu punte, metoda de compensație și metoda de opoziție.

1. MĂSURAREA REZISTENȚELOR PRIN METODA CU PUNTE

Puntea de măsurare este alcătuită din mai multe rezistențe legate între ele după o anumită schemă, de regulă sub forma unui patrulater închis, un aparat indicator de zero (un galvanometru) conectat într-una dintre diagonalele patrulaterului și sursa de alimentare (pilă sau baterie de acumulator sau o sursă alternativă), montată în cea de-a doua diagonală. Rezistența necunoscută, care trebuie determinată, este legată într-una dintre laturile patrulaterului.

În general, cu ajutorul punților se poate măsura orice rezistență electrică, de la cea mai mică pînă la cea mai mare valoare. Totuși, în practică, pentru măsurarea rezistențelor cu valori cuprinse între 1Ω și 1MΩ se folosește puntea simplă (puntea Wheatstone), iar pentru rezistențe mici și foarte mici, sub 1Ω pînă la 10^{-6}Ω, se folosește puntea dublă (puntea Thomson).

Puntea Wheatstone* este alcătuită din trei rezistențe cunoscute, R_a, R_b și R_c, care, împreună cu rezistența necunoscută, de măsurat R_x, formează laturile patrulaterului $ABCD$ din figura 5.6. Galvanometrul de curent continuu, care are o sensibilitate foarte mare (10^{-7} — 10^{-9} A/mm), este montat ca aparat de zero în diagonala CD a patrulaterului, iar în cealaltă diagonală se află sursa de curent continuu în serie cu o rezistență r, pentru limitarea curentului în circuit.

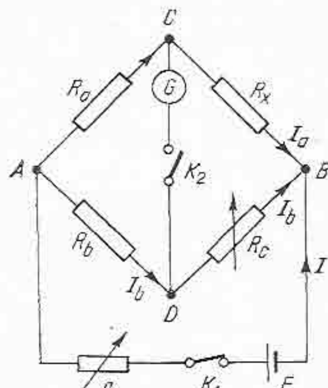


Fig. 5.6. Schema punții Wheatstone.

Determinarea rezistenței necunoscute presupune două operații, și anume: echilibrarea punții și calculul propriu-zis al rezistenței necunoscute.

Pentru echilibrarea punții se fixează valorile rezistențelor R_a și R_b și se variază R_c, pînă cînd, apăsîndu-se pe întreruptoarele K_1 și K_2, spotul luminos al galvanometrului este adus pe poziția zero a riglei gradate. În acest caz, curentul în diagonala CD este zero, datorită faptului că potențialele nodurilor C și D ale punții sînt egale, iar puntea se consideră echilibrată. Situația aceasta

* Puntea Wheatstone se folosește în mod curent la măsurările industriale de rezistență.

este posibilă numai dacă căderile de tensiune în brațele AC și AD și, respectiv, BC și BD sînt egale între ele, adică:

$$\Delta U_{AC} = \Delta U_{AD} \quad \text{și} \quad \Delta U_{BC} = \Delta U_{BD}$$

sau, ținîndu-se seamă de notațiile din figura 5.6:

$$R_a I_a = R_b I_b \quad \text{și} \quad R_x I_a = R_c I_b. \tag{5.11}$$

Valoarea rezistenței se află făcîndu-se raportul relațiilor (5.11), adică:

$$\frac{R_a}{R_x} = \frac{R_b}{R_c}, \tag{5.12}$$

de unde:

$$R_x = \frac{R_a}{R_b} \cdot R_c. \tag{5.13}$$

Relația (5.12) constituie condiția de echilibru a punții care, după cum se observă, depinde numai de valorile rezistențelor din laturile patrulaterului $ABCD$, fiind independentă de rezistențele interne ale sursei și ale aparatului de zero (galvanometrului).

Conform relațiilor (5.11), (5.12) sau (5.13), echilibrul punții se poate obține fie fixîndu-se rezistențele R_a și R_b într-un raport constant* și variindu-se rezistența de comparație R_c, fie invers, menținîndu-se constantă rezistența de comparație R_c și variindu-se raportul dintre rezistențele R_a și R_b.

Pentru a se putea calcula cu ușurință valoarea unei rezistențe măsurate, rezistențele R_a și R_b se fixează în așa fel încît raportul lor să aibă una dintre valorile: 0,001, 0,01, 0,1, 1, 10, 100, 1 000. În acest scop, ele sînt constituite din cutii cu rezistențe de 1 + 10 + 100 + 1 000 = 1 111 Ω.

Rezistența R_c este constituită dintr-o cutie cu rezistențe în decade, după cum urmează:

zece rezistențe a	1 000 Ω =	10 000 Ω
zece rezistențe a	100 Ω =	1 000 Ω
zece rezistențe a	10 Ω =	100 Ω
zece rezistențe a	1 Ω =	10 Ω
zece rezistențe a	0,1 Ω =	1 Ω
	Total	11 111 Ω

Ținîndu-se seamă de posibilitățile de măsurare ale punții Wheatstone, rezultă că rezistențele ce se pot determina, conform relației (5.13), au valorile cuprinse în limitele de $0{,}001 \times 0{,}1 = 0{,}0001$ Ω și $1\,000 \times 11\,111 = 11\,111\,000$ Ω. În practică însă, cu această punte nu se măsoară rezistențe mai mici de 1 Ω și mai mari de 1 MΩ.

Observații

1. Cînd se lucrează cu puntea Wheatstone, după ce se fixează valoarea rezistenței de comparație R_c și se caută să se vadă dacă puntea este echilibrată, se apasă mai întîi pe întreruptorul K_1, corespunzător stabilirii circu-

---

* De aceea, aceste rezistențe se mai numesc și rezistențe de raport. Obișnuit, se alege raportul $\frac{R_a}{R_b}$ constant și se variază rezistența de comparație R_c.

itului cu sursa electromotoare, şi apoi pe întreruptorul K_2 al galvanometrului. Dacă se procedează invers, se poate provoca deteriorarea galvanometrului.

2. Din cauza variaţiei în trepte a rezistenţei de comparaţie, de multe ori nu se poate realiza echilibrul punţii prin aducerea spotului luminos al galvanometrului la gradaţia zero de pe rigla gradată a acestuia. În aceste cazuri se va proceda astfel: se fixează rezistenţa R_{c_1}, care dă o deviaţie α_1 la stînga poziţiei de echilibru, şi apoi rezistenţa R_{c_2}, care dă deviaţia α_2 la dreapta poziţiei de echilibru.

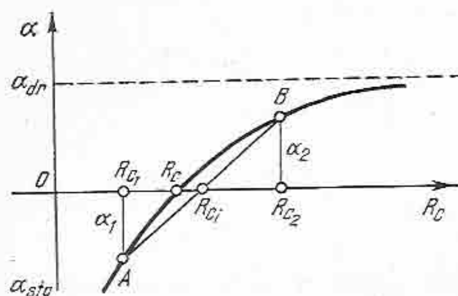


Fig. 5.7. Variaţia deviaţiilor galvanometrului în funcţie de rezistenţa de comparaţie.

Rezistenţa reală R_c care, dacă ar putea fi realizată, ar echilibra puntea, se determină prin interpolare, aproximîndu-se curba variaţiei deviaţiilor galvanometrului în funcţie de rezistenţa de comparaţie, în vecinătatea punctului de echilibru, cu o dreaptă (fig. 5.7) şi utilizîndu-se relaţia:

$$R_{c_i} = R_{c_1} + (R_{c_2} - R_{c_1}) \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}. \qquad (5.14)$$

Această rezistenţă de interpolare se introduce în ecuaţia (5.13) cu ajutorul căreia se calculează rezistenţa necunoscută.

3. În modelul de punte Wheatstone descris mai sus se menţine fix raportul celor două rezistenţe R_a şi R_b şi se variază rezistenţa de comparaţie R_c pînă cînd puntea se echilibrează. Există punţi la care valoarea rezistenţei R_c se menţine constantă, iar echilibrarea lor se realizează prin variaţia rezistenţelor R_a şi R_b, respectiv a raportului R_a/R_b. Acestea sînt punţile cu fir, la care valorile rezistenţelor R_a şi R_b sînt stabilite cu ajutorul unui cursor ce se deplasează pe un fir perfect calibrat. În figura 5.8 este reprezentată schema electrică a unei astfel de punţi cu fir calibrat, care se poate folosi în atelierele de montaj sau de reparaţii electrice.

Firul calibrat este pus în contact cu diagonala galvanometrului, pentru a se evita deteriorarea acestuia, ca urmare a scînteilor electrice.

Punţile cu fir calibrat se manipulează uşor, însă precizia rezultatelor obţinute este mai redusă.

Puntea Thomson permite măsurarea rezistenţelor mici şi foarte mici, eliminînd influenţa contactelor şi a conductoarelor de legătură asupra circuitului de măsurare, prin plasarea lor într-un circuit auxiliar.

În acest scop, puntea dublă este formată din două circuite, aşa cum se observă în figura 5.9.

Primul circuit este alcătuit din rezistenţa de măsurat R_x, în serie cu o rezistenţă de comparaţie etalon R_0 şi cu sursa de curent continuu, care este capabilă să debiteze un curent destul de mare (4—10 A). Cel de-al doilea circuit este format din rezistenţele m, n, o şi p, a căror valoare este de ordinul miilor de ohmi. Acestea din urmă, împreună cu rezistenţele R_x şi R_0, formează braţele punţii. Galvanometrul se leagă între rezistenţele m, n şi o, p.

Determinarea rezistenței necunoscute presupune, ca și la puntea Wheatstone, două operații, și anume: echilibrarea punții și calculul propriu-zis al rezistenței R_x.

Echilibrarea punții se realizează cu ajutorul rezistențelor m, n, o și p. Cînd curentul prin diagonala în care se conectează galvanometrul este zero,

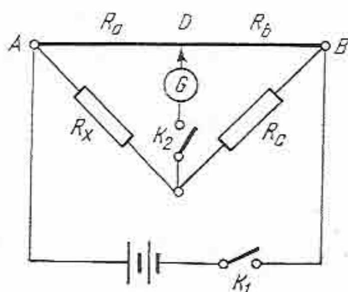


Fig. 5.8. Schema punții Wheatstone cu fir calibrat.

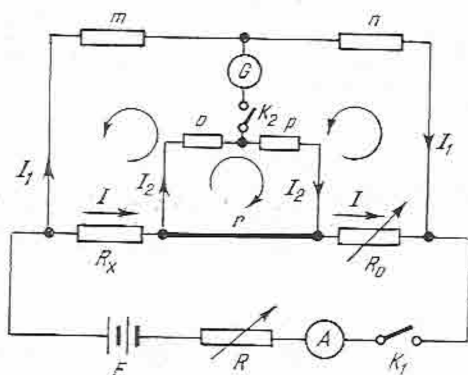


Fig. 5.9. Schema punții duble Thomson.

căderile de tensiune prin cele trei circuite ale punții, acceptîndu-se sensurile de circulație ale curenților ca în figura 5.9, sînt determinate de relațiile:

— pentru circuitul R_x, o, G, m: $IR_x + I_2o = I_1m$;

— pentru circuitul R_0, n, G, p: $IR_0 + I_2p = I_1n$;

— pentru circuitul o, p, r: $I_2(o+p) = (I - I_2)r$.

Rezolvîndu-se aceste ecuații în raport cu rezistența necunoscută R_x, se determină:

$$R_x = \frac{m}{n}R_0 + \frac{p \cdot r}{o+p+r}\left(\frac{m}{n} - \frac{o}{p}\right). \tag{5.15}$$

Dacă se iau rapoartele $\frac{m}{n}$ și $\frac{o}{p}$ egale, termenul al doilea din ecuația (5.15) este nul și rezistența necunoscută se calculează cu o relație asemănătoare celei determinate la puntea Wheatstone, adică:

$$R_x = R_0\frac{m}{n}. \tag{5.16}$$

Precizia determinărilor experimentale depinde în mare măsură de realizarea egalității celor două rapoarte ale rezistențelor m, n și o, p. În acest scop, legătura dintre rezistențe R_x și R_0 trebuie realizată cu un conductor de secțiune foarte mare și lungime mică, cu rezistență practic nulă. De asemenea, se recomandă ca rezistențele ce compun cele două rapoarte să aibă valori cît mai mari (de minimum 10Ω).

Punțile duble se realizează cu raportul brațelor $\frac{m}{n} = \frac{o}{p}$ constant sau variabil. În primul caz, echilibrarea punții se face prin variația rezistenței-

etalon R_0 (aşa cum s-a arătat), care în construcţiile practice poate fi construită dintr-un fir calibrat. În al doilea caz, variaţia raportului este realizată de obicei, prin reglarea rezistenţelor m şi o, care sînt constituite din rezistenţe cu decade duble cu manete cuplate mecanic.

Rezistenţele n şi p sînt constituite din cutii de rezistenţe cu fişe, ca şi în cazul punţii Wheatstone, care capătă valori egale, fixe.

Pentru atelierele de reparaţii electrice se utilizează punţi duble mai simple, cu ajutorul cărora se pot măsura, cu suficientă precizie, rezistenţe suficient de mici.

2. MĂSURAREA REZISTENŢELOR PRIN METODA DE COMPENSAŢIE

Metoda de compensaţie permite determinarea cu precizie mare a rezistenţelor electrice. Schema electrică de măsurare prin această metodă este reprezentată în figura 5.10, din care se observă că rezistenţa de măsurat este conectată într-un circuit auxiliar, în serie cu o rezistenţă-etalon R_0 şi cu bateria de alimentare E. Cu ajutorul comutatorului K se conectează succesiv rezistenţele R_0 şi R_x la bornele E_x ale montajului de compensaţie, măsurîndu-se căderile de tensiune $U_x = R_xI$ şi $U_0 = R_0I$, din care se deduce:

$$\frac{U_x}{U_0} = \frac{R_x}{R_0}$$

şi

$$R_x = R_0 \frac{U_x}{U_0}. \tag{5.17}$$

Rezistenţa-etalon se va stabili, pe cît posibil, de acelaşi ordin de mărime cu rezistenţa R_x, iar bateria de alimentare se va alege astfel, încît curentul I din circuitul auxiliar să aibă o valoare constantă, care să nu depăşească valoarea maximă admisibilă corespunzătoare celor două rezistenţe R_x şi R_0.

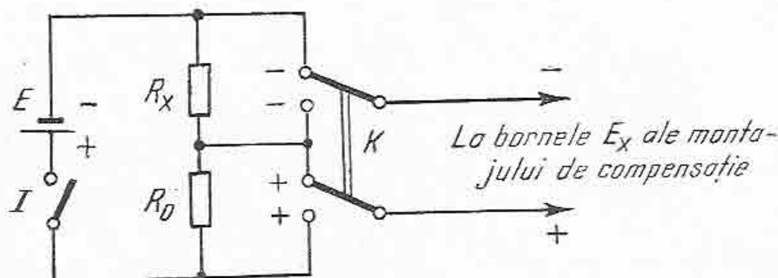


Fig. 5.10. Schema electrică de măsurare a rezistenţelor prin metoda de compensaţie.

3. MĂSURAREA REZISTENȚELOR PRIN METODA DE OPOZIȚIE

Metoda de opoziție pentru măsurarea rezistențelor este foarte precisă, fiind aplicată atît în laborator cît și în industrie. Montajul care se realizează este cel din figura 5.11, unde R_x reprezintă rezistența de măsurat, R_0 — o rezistență-etalon cu care se compară rezistența necunoscută, R_1 și R_2 — două cutii de rezistențe cu ploturi sau cu fișe, care se jumelează, R_{r_1} și R_{r_2} — rezistențe de reglaje și K — un comutator cu șase poziții.

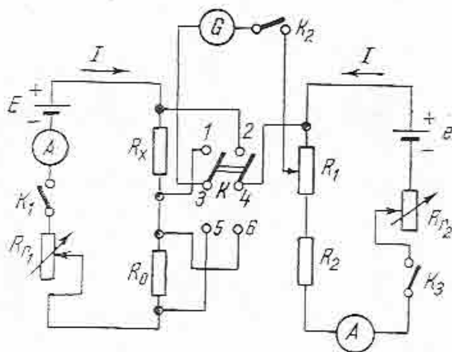


Fig. 5.11. Schema electrică de măsurare a rezistențelor prin metoda de opoziție.

Aducerea la zero a galvanometrului se face cu ajutorul rezistenței R_1, prin două operații succesive, și anume: punîndu-se comutatorul K în pozițiile *1—3*, *2—4*, se reglează R_1, pînă cînd, pentru o anumită rezistență R_1', se aduce galvanometrul la zero; apoi se comută K în poziția *3—5*, *4—6* și se reglează din nou R_1, pînă cînd, pentru valoarea nouă R_1'', galvanometrul este adus iarăși la zero.

Valoarea rezistenței necunoscute se calculează cu relația:

$$R_x = R_0 \frac{R_1'}{R_1''}. \tag{5.18}$$

C. MĂSURAREA REZISTENȚELOR FOARTE MARI

Prin rezistențe foarte mari se înțeleg rezistențele ale căror valori depășesc 1 MΩ. Acestea sînt, în general, rezistențele de izolație ale cablurilor și ale instalațiilor electrice, care nu pot fi măsurate cu puntea Wheatstone, deoarece tensiunea pilei sau a bateriei de acumulatoare ar trebui să fie prea mare pentru a se putea obține un curent la care galvanometrul să fie sensibil. Măsurarea lor se poate efectua atît în laborator, prin metoda galvanometrului sau prin metoda substituției, cît și direct, în industrie, folosindu-se megohmmetrul, care de altfel constituie aplicația industrială a metodei galvanometrului.

1. MĂSURAREA REZISTENȚELOR FOARTE MARI PRIN METODA GALVANOMETRULUI

Această metodă constă în măsurarea curentului care trece prin masa rezistorului de măsurat sau a curentului care trece pe la suprafața sa, cînd rezistența de măsurat este supusă unei tensiuni continue U.

Schema de montaj pentru măsurarea rezistenței interioare de volum a unei plăci izolante prin metoda galvanometrului este reprezentată în figura 5.12.

În jurul electrodului P_1 se așază un electrod auxiliar P, în formă de inel, care este legat direct la sursă prin firul marcat punctat, la același pol

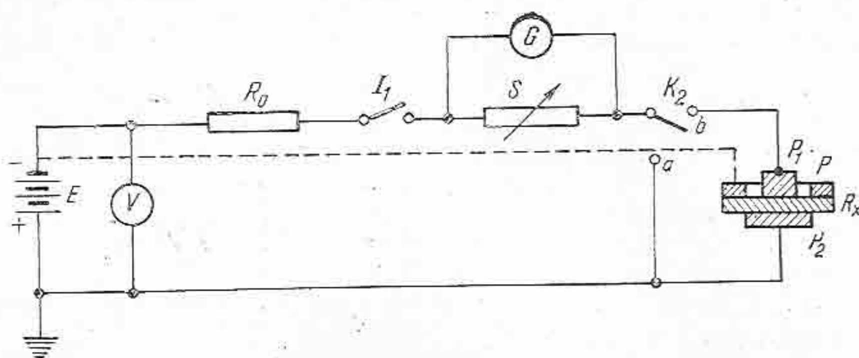


Fig. 5.12. Schema electrică de măsurare a izolației prin metoda galvanometrului.

la care este legat și electrodul P_1. În felul acesta, deoarece între electrozii P și P_1 nu există diferență de potențial, nu există nici curenți superficiali, iar galvanometrul măsoară numai curentul de volum care trece prin masa rezistorului de măsurat (placa R_x). Curenții superficiali care există numai între electrozii P_2 și P se închid prin circuitul bateriei, E (100—1 000 V), fără a mai trece prin galvanometru.

Determinările experimentale se fac în ordinea următoare:

— se fixează șuntul S în poziția de sensibilitate minimă și comutatorul K_2 în poziția a;

— se închide întreruptorul I_1 și se variază șuntul pînă cînd deviația inițială α_0 a galvanometrului G este suficient de mare. În acest caz se stabilește un curent prin circuitul realizat, a cărui valoare, dacă se neglijează rezistența galvanometrului și a șuntului, este dată de relația:

$$I_0 = \frac{U}{R_0} = C_I n_0 \alpha_0, \tag{5.19}$$

în care:

C_I este constanta de curent a galvanometrului;
n_0 — factorul de multiplicare a șuntului;
U — tensiunea indicată de voltmetru;
R_0 — rezistența-etalon (0,1—1 MΩ);

— se introduce apoi rezistența de izolație R_x în circuit, punînd comutatorul K_2 în poziția b;

— se citește deviația galvanometrului α_x care, evident, este mai mică decît α_0 datorită scăderii intensității curentului;

— se variază șuntul S corespunzător altui factor de multiplicare n_x, pînă cînd deviația α_x devine aproximativ egală cu α_0. Această condiție de egalitate a celor două deviații face ca constanta de curent a galvanome-

trului în cele două determinări să fie aceeași (aceasta nu este riguros constantă, ci variază în lungul scării);

— se determină curentul I_x corespunzător circuitului stabilit, scriindu-se:

$$I_x = C_I n_x \alpha_x \approx \frac{U}{R_0 + R_x}; \tag{5.20}$$

— se determină rezistența R_x din raportul dintre relațiile (5.19) și (5.20), adică:

$$\frac{I_0}{I_x} = \frac{C_I n_0 \alpha_0}{C_I n_x \alpha_x} = \frac{R_0 + R_x}{R_0},$$

de unde:

$$R_x = R_0\left(\frac{n_0 \alpha_0}{n_x \alpha_x} - 1\right). \tag{5.21}$$

Se menționează că curentul I_x este variabil și scade cu timpul, tinzînd către o valoare constantă. De aceea, citirea deviației galvanometrului α_x se va face numai după un interval anumit de timp, care convențional s-a stabilit la un minut.

2. MĂSURAREA REZISTENȚELOR FOARTE MARI PRIN METODA DE SUBSTITUȚIE

Metoda de substituție este analoagă metodei galvanometrului, cu deosebirea că rezistența-etalon R_0 este montată în derivație cu rezistența de izolație R_x (fig. 5.13). Modul de experimentare este următorul:

— se formează un circuit din rezistența de măsurat R_x, bateria de acumulatoare E, care are o tensiune de minimum 100 V, și galvanometrul G cu șuntul său S;

— corespunzător unei anumite valori a șuntului, care determină sensibilitatea minimă a galvanometrului, se fixează comutatorul K_2 în poziția a și se citește deviația α_x a galvanometrului; în acest caz se stabilește curentul I_x, care trece prin rezistența necunoscută R_x, a cărei valoare este:

$$I_x = C_I n_x \alpha_x = \frac{U}{R_x + \dfrac{R_g S_x}{R_g + S_x}} \approx \frac{U}{R_x}, \tag{5.22}$$

în care:

C_I reprezintă constanta de curent a galvanometrului;
U — tensiunea aplicată măsurată cu voltmetrul V;
R_x — rezistența de măsurat;
S_x — rezistența șuntului corespunzătoare factorului de multiplicare n_x;
R_g — rezistența interioară a galvanometrului;

— se înlocuiește apoi rezistența R_x cu rezistența-etalon cunoscută R_0, prin mutarea comutatorului în poziția b;

— pentru o altă valoare a șuntului S_0 se citește deviația α_0 a galvanometrului. Se variază șuntul pentru a se obține deviația α_0 apropiată de α_x sau, în cazul în care cele două rezistențe R_x și R_0 sînt foarte diferite, pentru a se obține deviații ușor de citit.

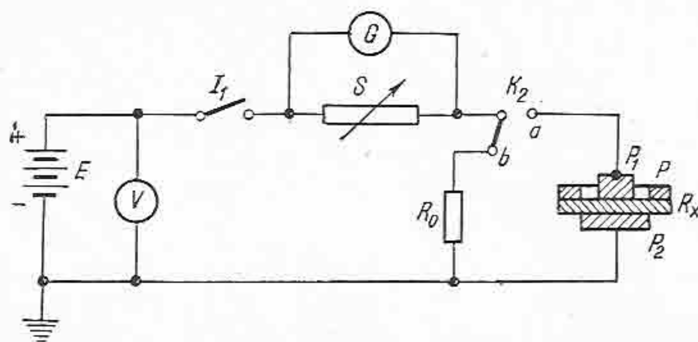


Fig. 5.13. Schema electrică de măsurare a rezistențelor de izolație prin metoda substituției.

Curentul stabilit în acest caz în circuit are valoarea:

$$I_0 = C_1 n_0 \alpha_0 = \frac{U}{R_0 + \frac{R_g S_0}{R_g + S_0}} \approx \frac{U}{R_0}. \qquad (5.23)$$

Rezistența de izolație R_x rezultă din relațiile (5.22) și (5.23) și are valoarea:

$$R_x = R_0 \frac{n_0 \alpha_0}{n_x \alpha_x}. \qquad (5.24)$$

Trebuie menționat că rezistența echivalentă rezultată din punerea în paralel a șuntului și a galvanometrului a putut fi neglijată la determinarea curenților I_0 și I_x, datorită faptului că valoarea acesteia este mult prea mică în raport cu R_0 și R_x.

3. MĂSURAREA ÎN PRACTICĂ A REZISTENȚELOR DE IZOLAȚIE

În practică, rezistențele foarte mari se măsoară cu megohmmetrul, aparat cunoscut sub denumirea curentă de ohmmetru cu inductor (v. pct. 5.3).

El este folosit, în general, pentru verificarea rezistenței de izolație a instalațiilor electrice, precum și a mașinilor și a aparatelor electrice, obținîndu-se numai indicații aproximative. Valoarea izolației unei instalații trebuie să fie de cel puțin 1 000 Ω pentru fiecare volt al tensiunii de utilizare. Astfel, pentru o rețea de 220 V, rezistența de izolație trebuie să fie mai mare decît 220 000 Ω.

Verificarea nivelului de izolație a unei instalații electrice presupune totdeauna mai multe măsurări, și anume: măsurarea rezistenței întregii instalații față de pămînt, a rezistenței fiecărui circuit față de pămînt și a rezistenței dintre două circuite.

Măsurarea rezistenței de izolație a întregii instalații electrice față de pămînt necesită următoarele operații: se scot mai întîi toate siguranțele de la tablou, astfel încît să existe certitudinea că instalația a fost scoasă de sub tensiune. Se închid apoi toate întreruptoarele, se pun în circuit toate aparatele consumatoare de energie electrică și se verifică dacă lămpile de iluminat sînt bine înșurubate. În acest fel, întreaga instalație alcătuiește un singur circuit, a cărui rezistență de izolație trebuie determinată.

Măsurarea se face după schema electrică din figura 5.14, în care un capăt al instalației se leagă la una dintre bornele megohmmetrului (borna K), iar cealaltă bornă a aparatului (borna E) la pămînt (conducta de apă).

Pentru verificare se apasă pe butonul P (dacă există) și se învîrtește manivela M. Se citește apoi indicația aparatului care, dacă izolația totală a instalației față de pămînt este bună, trebuie să fie egală cu cel puțin 1 000 U (Ω). În caz contrar nu se poate afirma că izolația instalației nu este bună, ci trebuie să se măsoare diversele circuite, deoarece regulamentele indică valori ale rezistențelor de izolație pentru circuite, separate, nu pentru instalații complete.

Măsurarea rezistenței de izolație a fiecărui circuit față de pămînt se face cu toate aparatele de utilizare scoase din circuit, respectiv cu toate lămpile deșurubate. Schema electrică de verificare este aceeași ca în figura 5.14, măsurarea presupunînd aceeași succesiune de operații ca și în cazul precedent.

Măsurarea rezistenței de izolație dintre două circuite. Măsurările precedente făcute față de pămînt nu indică dacă circuitele electrice sînt bine izolate între ele. Pentru a se constata aceasta se face o nouă determinare, folosindu-se schema electrică din figura 5.15, în care toate aparatele de utilizare, respectiv lămpile, sînt scoase din circuit. După cum se observă, în acest caz, borna E nu se mai leagă la pămînt, ci la cel de-al doilea conductor al circuitului.

Dacă valoarea rezistenței de izolație obținută prin această măsurare este egală sau mai mare decît cea indicată în norme, atunci instalația este bună.

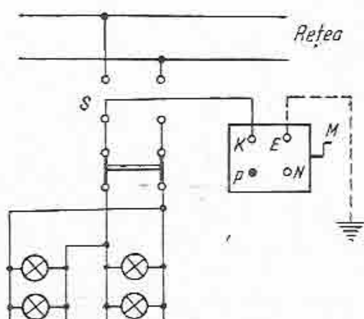


Fig. 5.14. Schema electrică de verificare a rezistenței de izolație a unei instalații față de pămînt.

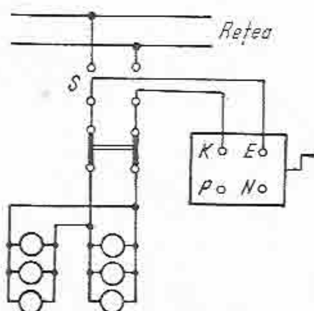


Fig. 5.15. Schema electrică de verificare a rezistenței de izolație dintre două circuite.

4. MĂSURAREA REZISTENŢELOR PRIZELOR DE PĂMÎNT

Verificarea prizelor de pămînt este absolut necesară deoarece, dacă valoarea rezistenţelor depăşeşte anumite limite impuse prin norme, există pericolul de creare a anumitor zone de tensiune periculoase în jurul prizelor.

În general, în instalaţiile electrice de energie, valoarea rezistenţelor prizelor variază de la cîteva zecimi de ohm pînă sub un ohm, în funcţie de tipul fiecărei instalaţii. Măsurările de verificare se fac totdeauna în curent alternativ, deoarece utilizarea curentului continuu ar provoca fenomene de electroliză în jurul prizelor de pămînt, ceea ce ar avea ca efect obţinerea unor rezultate eronate. Ca aparate se pot utiliza punţi de măsură, în care galvanometrul este înlocuit cu un telefon sau cu un aparat electrodinamic.

O schemă de măsurare este reprezentată în figura 5.16, care utilizează o punte cu fir şi cel puţin două prize auxiliare *H*, dispuse la 20 m una de alta şi la 20 m faţă de priza măsurată.

Modul de lucru cu această punte este analog cazului studiat la subcapitolul B.1 (observaţia 3), în care pentru echilibrare se variază raportul dintre cele două rezistenţe ale firului calibrat, cu ajutorul cursorului legat la telefonul *T* pînă cînd sunetul recepţionat nu se mai aude. Măsurările se fac utilizîndu-se perechi de electrozi formate dintr-o priză *A*, a cărei rezistenţă trebuie determinată şi, fiecare electrod auxiliar *B* sau *C*.

În acest fel se măsoară succesiv rezistenţele:

$$R_{AB} = R_A + R_B;$$
$$R_{AC} = R_A + R_C; \qquad (5.26)$$
$$R_{BC} = R_B + R_C,$$

din care se deduce rezistenţa căutată:

$$R_A = \frac{R_{AB} + R_{AC} - R_{BC}}{2}. \qquad (5.27)$$

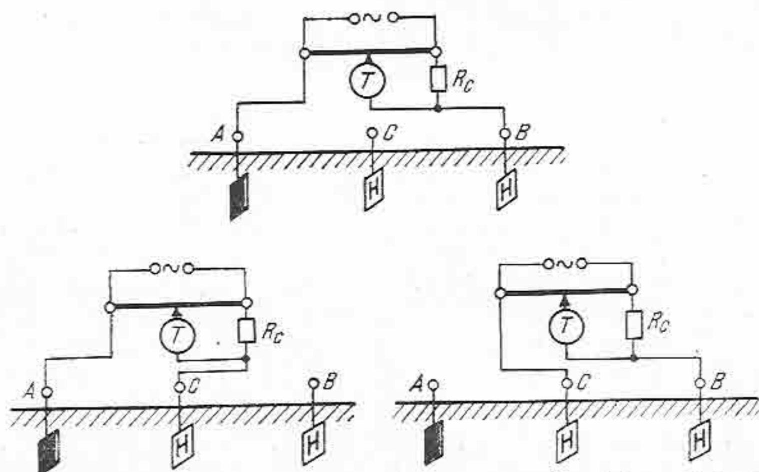


Fig. 5.16. Schemele electrice de măsurare a rezistenţelor prizelor de pămînt cu utilizarea de prize auxiliare.

În locul punții cu fir, pentru măsurare, se poate utiliza un aparat care permite măsurarea directă a rezistenței prizei de pămînt. Montajul electric ce trebuie realizat este reprezentat în figura 5.17, de unde se observă că și în acest caz sînt necesare prize auxiliare (S și H), dispuse în același mod ca în cazurile

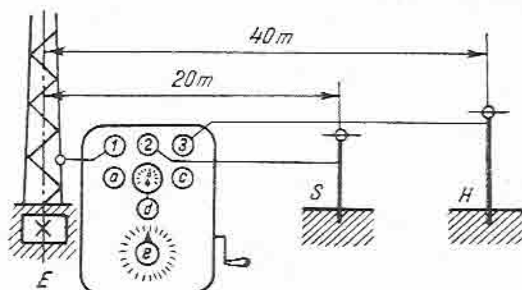


Fig. 5.17. Schema electrică de montaj a aparatului pentru măsurarea rezistențelor prizelor de pămînt.

precedente. Sursa de curent este un inductor, iar măsurarea propriu-zisă se face prin aducerea la zero a galvanometrului, cu ajutorul rezistenței de pe cadranul aparatului. În felul acesta se citește direct valoarea rezistenței prizei de pămînt măsurate E.

5. DETERMINAREA LOCULUI DE DETERIORARE A IZOLAȚIEI UNUI CABLU

Determinarea punctului de punere la pămînt a unui cablu, atunci cînd el nu este rupt, se reduce la măsurarea unei rezistențe, ceea ce se poate face prin mai multe metode. Una dintre metodele cel mai des aplicate este metoda buclei, cu ajutorul căreia se determină locul de deterioare a izolației, atunci cînd străpungerea s-a produs între conductoare și armătură sau între două conductoare ale unui cablu cu trei conductoare.

Metoda buclei, formată din conductoarele cablului sau ale liniei, reprezintă o aplicație a punții Wheatstone.

În figura 5.18 este reprezentată schema de principiu pentru măsurare, în care două brațe ale punții sînt realizate de cablul defect X și de un cablu bun Y de aceeași lungime L. Capetele conductoarelor cablurilor se leagă împreună în punctul 4. La celelalte două capete, 1 și 2, se conectează un galvanometru și două cutii de rezistențe variabile, care formează celelalte două brațe ale punții.

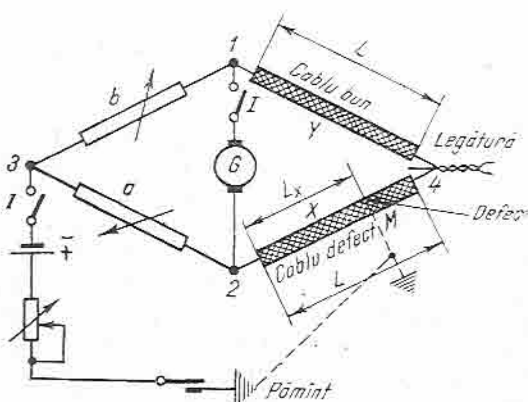


Fig. 5.18. Schemă pentru determinarea punctului de defect într-un cablu prin metoda buclei, cînd se dispune de un cablu auxiliar.

Uneori, cutiile de rezistențe se înlocuiesc cu o sîrmă calibrată împărțită în două de un contact mobil. Clema care face legătura între cutiile de rezistență (sau contactul mobil) se leagă printr-o rezistență de protecție cu bateria și apoi la pămînt care, după cum se observă din figură, constituie unul dintre nodurile punții (nodul M).

Dacă întreruptoarele sînt închise și puntea echilibrată (operație care se face analog celor studiate anterior), se poate scrie:

$$\frac{a}{b}=\frac{R_x}{2R_L-R_x}=\frac{L_x}{2L-L_x}, \tag{5.28}$$

în care:

a și b sînt cele două rezistențe variabile din brațele *1—3* și *2—3* ale punții;
R_L este rezistența totală a cablului bun și a celui defect;
L — lungimea cablului bun și a celui defect;
R_x — rezistența cablului de la nodul *2* pînă la nodul M al punții (punctul de defect);
L_x — lungimea cablului de la nodul *2* pînă la punctul de defect.

Din relația (5.28), se determină distanța pînă la punctul de defect, scriindu-se:

$$R_x = 2R_L\frac{a}{a+b}$$

sau

$$L_x = 2L\frac{a}{a+b}. \tag{5.29}$$

În schema electrică pentru determinările experimentale și în calculele efectuate s-a considerat că lungimea cablului bun (auxiliar) este egală cu cea a cablului defect, iar secțiunea conductoarelor este aceeași. Dacă cablurile ar fi avut lungimi diferite însă aceleași secțiuni, atunci relația din care ar fi reieșit lungimea L_x, după echilibrarea punții, ar fi deci:

$$\frac{a}{b}=\frac{R_x}{R_A+R-R_x}=\frac{L_x}{L_A+L-L_x} \tag{5.30}$$

sau

$$L_x = (L_a+L)\frac{a}{a+b}, \tag{5.31}$$

în care:

$L_A(R_A)$ este lungimea (rezistența) cablului bun;
$L(R)$ — lungimea (rezistența) cablului defect;
$L_x(R_x)$ — lungimea (rezistența) pînă la punctul de defect.

Dacă însă și lungimile și secțiunile cablurilor sînt diferite, atunci se face următorul raționament: fie L_A lungimea conductorului sau a cablului auxiliar (bun) și s_A secțiunea lui; fie s secțiunea conductorului defect și L lungimea sa echivalentă. Dacă conductorul auxiliar ar avea secțiunea egală cu unitatea, atunci lungimea sa ar fi — pentru aceeași rezistență — de s_A ori mai mică, adică L_A/s_A; dacă secțiunea ar crește de s ori, pentru a se păstra aceeași rezistență, ar trebui să crească și lungimea de s ori, adică:

$$L_A' = L_A\frac{s}{s_A} \tag{5.32}$$

Schema de experimentare rămînînd aceeași, cînd puntea este echilibrată, se poate scrie relația:

$$\frac{L_x}{L'_A + L - L_x} = \frac{a}{b},$$

de unde:

$$L_x = (L'_A + L)\frac{a}{a+b}$$

sau, ținîndu-se seamă de valoarea lui L'_A, se obține:

$$L_X = \left(L + L_A\frac{s}{s_A}\right)\frac{a}{a+b} \quad (5.33)$$

În același mod se pot calcula și lungimile echivalente ale cablurilor de legătură la punte, care se adaugă lungimilor corespunzătoare ale conductoarelor (cablurilor) auxiliar și defect.

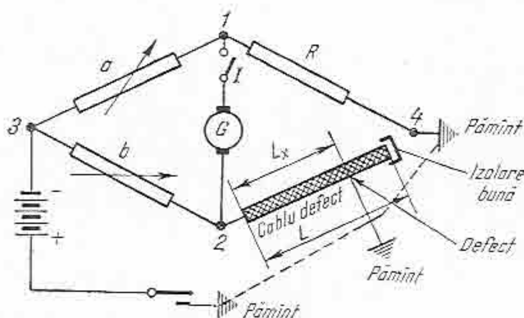


Fig. 5.19. Schemă pentru determinarea punctului de defect într-un cablu prin metoda buclei, cînd nu se dispune de un cablu auxiliar.

Dacă nu se dispune de un cablu auxiliar, atunci se realizează o punte cu trei rezistențe variabile, al patrulea braț fiind format din rezistența cablului defect, ca în figura 5.19. Un nod al punții este legat la pămînt.

Determinarea punctului de defect se face prin două măsurări, cîte una la fiecare capăt, celălalt capăt fiind bine izolat. Puntea se echilibrează în ambele cazuri, obținîndu-se rezistențele a, b, R, a_1, b_1 și R_1 și relațiile:

$$R_x = R\frac{a}{b} \quad \text{și} \quad R_{1x} = R_1\frac{a_1}{b_1},$$

însă:

$$R_x = \rho\frac{L_x}{s} \quad \text{și} \quad R_{1x} = \rho\frac{L - L_x}{s},$$

în care:

L este lungimea cablului;
L_x — distanța de la nodul punții pînă la punctul de defect;
s — secțiunea conductorului;
ρ — rezistivitatea materialului conductor.

Din relațiile de mai sus se obține:

$$\frac{L - L_x}{L_x} = \frac{R_{1x}}{R_x} = \frac{R_1}{R}\cdot\frac{a_1}{a}\cdot\frac{b}{b_1},$$

de unde rezultă:

$$L_x = \frac{Rab_1}{R_1a_1b + Rab_1}L. \quad (5.34)$$

Pentru obținerea unor măsurări cît mai exacte este necesar ca rezistențele de contact și rezistențele conductoarelor de legătură între capetele cablurilor și cutiile de rezistență să fie cît mai mici, pentru a putea fi neglijate în calcule.

În afara metodelor indicate mai sus există și alte metode cu ajutorul cărora se poate determina punctul de defect într-o linie sau într-un cablu. Unele dintre aceste metode se bazează pe măsurarea rezistenței de izolație, altele pe măsurarea capacității cablului. Acestea din urmă, care dau rezultate mai bune numai în cazul cablurilor, se aplică mai ales cînd cablurile sînt rupte.

REZUMAT

Pentru măsurarea rezistențelor electrice se folosesc:

Metode industriale	— ampermetru și voltmetru — voltmetru și rezistența-etalon — ohmmetru
Metode de laborator	— punte simplă (Wheatstone) — punte dublă (Thomson) — de compensație
Metode pentru rezistențe foarte mari	— galvanometru — de substituție

ÎNTREBĂRI RECAPITULATIVE

1. *Dintre montajul aval și amonte, care prezintă erori de măsurare mai mici și în ce condiții?*
2. *Cum variază erorile de măsurare a rezistențelor în funcție de tensiunea de alimentare a punții Wheatstone?*
3. *Idem, în cazul ohmmetrului cu inductor?*
4. *Idem, în cazul ohmmetrului cu montaj șunt?*
5. *Se poate verifica nivelul de izolație al unei instalații electrice printr-o singură operație?*

CAPITOLUL 6

MĂSURAREA INDUCTANȚELOR ȘI A CAPACITĂȚILOR

A. MĂSURAREA INDUCTANȚELOR

Inductanțele se pot măsura fie prin metode industriale (metoda ampermetrului și a voltmetrului), fie prin metode de laborator (metoda cu punte).

1. METODA AMPERMETRULUI ȘI A VOLTMETRULUI

Pentru măsurarea inductanței proprii prin metoda ampermetrului și a voltmetrului se utilizează schema din figura 6.1, în care se realizează montajul amonte, cînd comutatorul K se află pe poziția a, sau montajul aval, cînd comutatorul K se află pe poziția b.

În curent continuu se determină rezistența R, iar în curent alternativ se determină impedanța Z, a cărei valoare se calculează cu relația:

— pentru montajul amonte:

$$Z^2 = \left(\frac{U}{I}\right)^2 - R_A(R_A + 2R); \tag{6.1}$$

— pentru montajul aval:

$$Z^2 = \frac{U(U + 2RI_V)}{I^2 - I_V^2}, \tag{6.2}$$

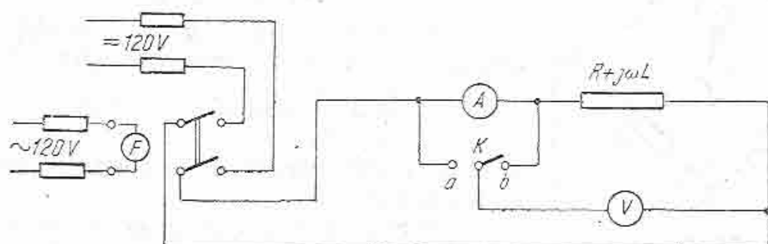


Fig. 6.1. Schemă pentru măsurarea inductanțelor prin metoda industrială.

în care:

U și I sînt valorile efective ale tensiunii și ale curentului indicate de voltmetrul V (cu inductanță neglijabilă în comparație cu rezistența sa interioară g) și ampermetrul A (cu rezistența sa interioară R_A);

$I_V = \frac{U}{g}$ — valoarea efectivă a curentului absorbit de voltmetru.

Valoarea inductanței L rezultă prin măsurare indirectă din relația:

$$L = \frac{1}{\omega}\sqrt{Z^2 - R^2}, \quad (6.3)$$

în care:

R este rezistența bobinei măsurate în curent continuu;

$\omega = 2\pi f$ — pulsația tensiunii sinusoidale de alimentare;

Z — impedanța bobinei a cărei inductanță se măsoară.

Ca și în cazul rezistențelor, se folosește montajul amonte, atunci cînd impedanța are valoare relativ mare, și respectiv montajul aval, cînd impedanța are valoare mică.

2. METODE CU PUNTE

Pentru măsurarea inductanțelor (precum și a capacităților) prin metoda cu punte se utilizează puntea de curent alternativ, a cărei schemă generală este dată în figura 6.2. Ea are cele patru brațe formate din impedanțele Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 (dintre care unele sînt rezistențe ohmice). Sursa de curent alternativ se conectează între nodurile $A-B$, iar aparatul indicator de zero între nodurile $C-D$.

Condiția de echilibrare se realizează ca și la puntea de curent continuu, adică efectuîndu-se egalitatea căderilor de tensiune în brațele AC și AD, precum și în brațele BC și BD. Dacă se folosesc notațiile fazoriale în curent alternativ, egalitățile căderilor de tensiune se scriu sub forma:

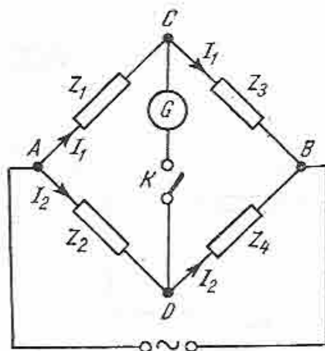


Fig. 6.2. Schema generală a punții de curent alternativ.

$$\underline{I}_1\underline{Z}_1 = \underline{I}_2\underline{Z}_2; \quad \underline{I}_1\underline{Z}_3 = \underline{I}_2\underline{Z}_4. \quad (6.4)$$

Împărțindu-se aceste egalități, se obține condiția generală de echilibrare a punții:

$$\frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_3} = \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_4} \text{ sau } \underline{Z}_1\underline{Z}_4 = \underline{Z}_2\underline{Z}_3, \quad (6.5)$$

din care rezultă următoarele condiții particulare de echilibrare:

$$Z_1Z_4 = Z_2Z_3 \text{ (condiția de modul)}; \quad (6.6)$$

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 \text{ (condiția de argument sau de fază)}, \quad (6.7)$$

în care:

Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 reprezintă modulele impedanţelor braţelor;

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ — argumentele impedanţelor braţelor.

Relaţiile (6.6) şi (6.7) arată că pentru echilibrarea punţii de curent alternativ este necesar să se realizeze egalitatea produselor modulelor impedanţelor din braţele opuse, precum şi egalitatea sumelor argumentelor acestora.

Metodele cu punte pentru măsurarea inductanţelor au numeroase variante de montaj, dintre care cele mai utilizate au două braţe formate din rezistenţe pur active, iar celelalte din impedanţe de comparaţie.

În acest caz din condiţia (6.7), pentru obţinerea echilibrului rezultă următorul mod de alcătuire a punţilor: dacă rezistenţele pur active alcătuiesc două braţe alăturate ($\varphi_1 = \varphi_2 = 0$), atunci celelalte două braţe vor fi alcătuite din impedanţe de acelaşi fel — inductive sau capacitive, pentru ca argumentele să aibă acelaşi semn, adică $\varphi_3 = \varphi_4$; dacă rezistenţele alcătuiesc două braţe opuse, de exemplu $\varphi_1 = \varphi_4 = 0$, atunci celelalte două braţe vor fi alcătuite din impedanţe care să îndeplinească condiţia $\varphi_2 + \varphi_3 = 0$ sau $\varphi_2 = -\varphi_3$, adică impedanţele au caracter diferit — inductiv şi capacitiv.

Ţinîndu-se seamă de aceste indicaţii, se vor arăta montajele cele mai uzuale de măsurare a inductanţelor.

Puntea Maxwell cu bobină-etalon variabilă, a cărei schemă de montaj este reprezentată în figura 6.3, este alcătuită din rezistenţele pur active R_1, R_2 şi R, bobina a cărei inductanţă se măsoară L_X (de rezistenţă R_X) şi bobina de inductanţă etalon L_0 (de rezistenţă R_0). Determinarea mărimii necunoscute L_X se face prin comparaţie cu bobina-etalon.

Rezistenţa variabilă R serveşte la echilibrarea punţii şi poate fi pusă în circuit cu ajutorul comutatorului K, după caz, în serie fie cu bobina care se măsoară, fie cu bobina-etalon, în funcţie de mărimea raportului $\frac{R_X}{R_0} = \frac{L_X}{L_0}$. Echilibrul punţii nu se poate obţine decît într-una din aceste posibilităţi.

Modul de lucru este următorul:

— se echilibrează puntea, mai întîi în curent continuu, alegîndu-se un anumit raport $\frac{R_1}{R_2}$ şi variindu-se rezistenţa R, pînă cînd indicaţia la galvanometrul de curent continuu G este zero;

— se alimentează apoi puntea în curent alternativ şi pentru acelaşi raport $\frac{R_1}{R_2}$ se obţine echilibrul cu ajutorul unui galvanometru de vibraţii GV sau al unei căşti telefonice, variindu-se inductanţa etalon L_0;

— se face apoi o nouă echilibrare în curent continuu şi în curent alternativ, astfel încît, după cîteva reglări succesive, puntea rămîne în echilibru atît în curent continuu, cît şi în curent alternativ.

Cînd puntea este echilibrată şi rezistenţa R este în serie cu bobina de măsu-

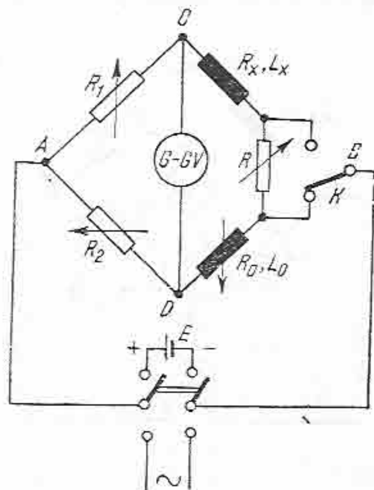


Fig. 6.3. Puntea cu inductanţă variabilă.

rat, condiția generală a echilibrului punții de curent alternativ (6.5) devine:

$$R_1(R_0 + j\omega L_0) = R_2(R + R_X + j\omega L_X). \tag{6.8}$$

Dacă în relația (6.8) se separă părțile reale de cele imaginare, se obține:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R + R_X}{R_0} \text{ și } \frac{R_1}{R_2} = \frac{L_X}{L_0}, \tag{6.9}$$

de unde:

$$L_X = L_0 \frac{R_1}{R_2}. \tag{6.10}$$

Cînd puntea este echilibrată și rezistența R se află în serie cu bobina-etalon L_0, din condiția generală de echilibru rezultă:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_X}{R_0 + R} \text{ și } \frac{R_1}{R_2} = \frac{L_X}{L_0}, \tag{6.11}$$

de unde:

$$L_X = L_0 \frac{R_1}{R_2}. \tag{6.12}$$

Puntea Maxwell cu condensator-etalon variabil are schema de montaj dată în figura 6.4, în care rezistențele variabile R_0, R_1 și R_2 sînt rezistențele de precizie neinductive. Condensatorul-etalon C_0 este montat în paralel cu rezistența R_0.

Ca și la puntea cu inductanță-etalon, echilibrarea necesită un dublu reglaj, și anume:

— în curent continuu, cu ajutorul galvanometrului magnetoelectric, luîndu-se un anumit raport $\frac{R_1}{R_2}$ și variindu-se rezistența R_0;

— în curent alternativ, cu ajutorul galvanometrului de vibrații (sau a căștii telefonice), păstrîndu-se același raport $\frac{R_1}{R_2}$ și variindu-se capacitatea condensatorului-etalon C_0.

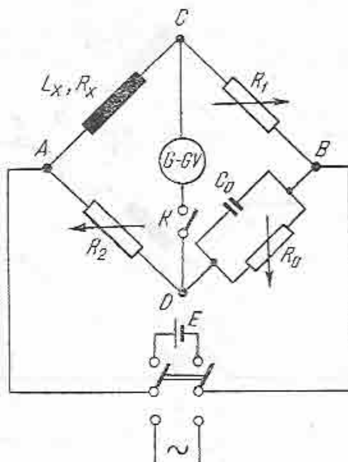


Fig. 6.4. Puntea cu condensator etalon variabil.

La echilibru, conform condiției generale de echilibru a punților de curent alternativ ($Z_1Z_4 = Z_2Z_3$), rezultă că:

$$(R_X + j\omega L_X) \frac{R_0}{1 + j\omega C_0 R_0} = R_1 R_2. \tag{6.13}$$

Separîndu-se părțile reale și cele imaginare, rezultă:

$$\frac{R_X}{R_2} = \frac{R_1}{R_0} \text{ și } \frac{L_X}{R_2} = R_1 C_0, \tag{6.14}$$

de unde:

$$L_X = R_1 R_2 C_0. \tag{6.15}$$

Puntea Anderson are schema de montaj dată în figura 6.5, care cuprinde următoarele elemente: rezistențele variabile de precizie R_1, R_2, R_3 și r, condensatorul C de capacitate

cunoscută, galvanometrul G, cu care se face echilibrarea punții în curent continuu, și casca telefonică T, cu care se face echilibrarea punții în curent alternativ.

Măsurările se fac în două etape, ca și la celelalte punți, și anume:

— folosindu-se bateria E se echilibrează mai întîi puntea în curent continuu, ca și puntea Wheatstone, avînd desfăcută legătura la condensatorul C și rezistența $r = 0$ (pentru a se mări sensibilitatea galvanometrului). Se lucrează cu valori arbitrare ale rezistențelor R_1 și R_2 și se variază numai rezistența R_3. În situația de echilibru rezultă rezistența R_X a bobinei, care este dată de relația:

$$R_X = R_3 \frac{R_1}{R_2}; \tag{6.16}$$

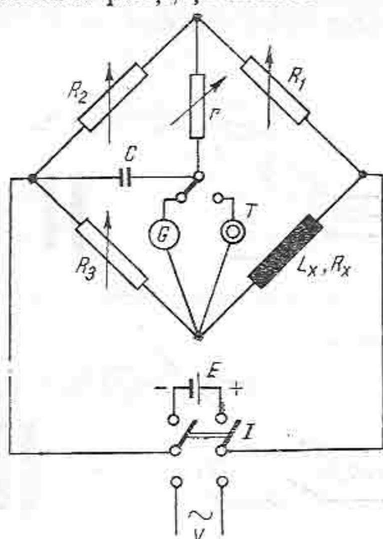


Fig. 6.5. Puntea Anderson pentru măsurarea inductanței.

— se întrerupe apoi alimentarea de la bateria E și se alimentează puntea în curent alternativ de la sursa $V\sim$. Se introduc în montaj condensatorul C și casca telefonică T și, lăsîndu-se nemodificate rezistențele R_1, R_2 și R_3, se variază numai rezistența r pînă la echilibrare, adică pînă cînd sunetul în cască devine minim. Se calculează inductanța cu ajutorul relației:

$$L_X = CR_3\left(r + R_1 + r\frac{R_1}{R_2}\right), \tag{6.17}$$

care reiese din condiția generală de echilibrare a punților de curent alternativ.

Măsurarea este posibilă numai dacă $L_X \geqslant CR_1R_3$; în caz contrar, nu este posibilă echilibrarea punții în curent alternativ (nu se poate obține un sunet minim în casca telefonică) și se va modifica una dintre mărimile C, R_1 sau R_3 (de preferință C), pînă cînd se obține echilibrarea necesară.

B. MĂSURAREA INDUCTANȚELOR MUTUALE

Măsurarea inductanțelor mutuale dintre două bobine (ca, de exemplu, înfășurările unui transformator) se face cu metoda ampermetrului și a voltmetrului, cu metoda comparației și cu metode cu punte.

1. METODA AMPERMETRULUI ȘI A VOLTMETRULUI

Această metodă se poate aplica în două variante, și anume:

— *Varianta I*, care permite măsurarea directă a inductanței mutuale L_{12} între două bobine, cu ajutorul montajului dat în figura 6.6, *a*. Ea necesită un ampermetru A care măsoară curentul primar I_1, un voltmetru V, care măsoară tensiunea secundară U_2, și un frecvențmetru F, care măsoară frecvența f.

Inductanța mutuală rezultă din relația:

$$L_{12} = M \approx \frac{U_2}{\omega I_1} = \frac{U_2}{2\pi f \cdot I_1}. \tag{6.18}$$

Această metodă dă rezultate satisfăcătoare numai dacă voltmetrul are impedanță internă foarte mare, iar tensiunea aplicată pe primar U_1 este sinusoidală.

— *Varianta a II-a*, care permite măsurarea indirectă a inductanței mutuale prin măsurarea inductivităților L' și L'' (fig. 6.6, *b* și 6.6, *c*), ale căror valori sînt date de relațiile:

$$L' = L_1 + L_2 + 2M \text{ și } L'' = L_1 + L_2 - 2M. \qquad (6.19)$$

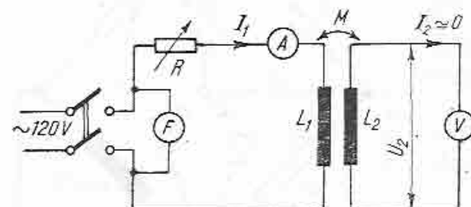
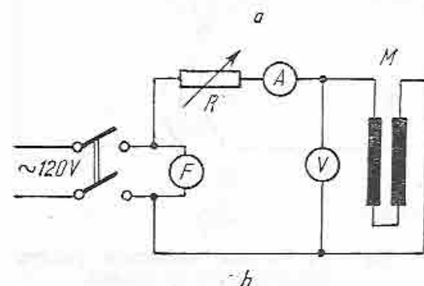
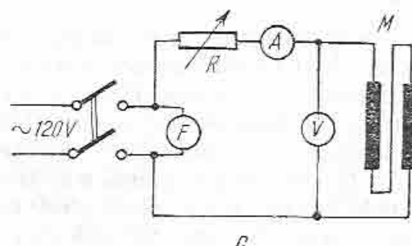


Fig. 6.6. Scheme pentru măsurarea inductanțelor mutuale:
a — măsurarea directă; *b* și *c* — măsurarea indirectă utilizîndu-se montajul adițional și diferențial.





Inductanța L' rezultă din montajul adițional (fig. 6.6, *b*), iar inductanța L'' rezultă din montajul diferențial sau în opoziție (fig. 6.6, *c*).

Scăzîndu-se cele două relații, rezultă:

$$M = \frac{1}{4}(L' - L''). \qquad (6.20)$$

2. METODA DE COMPARAȚIE (metoda Felici)

Conform acestei metode, inductanța mutuală necunoscută M_x se determină prin comparație cu o inductanță mutuală etalon M_0, variabilă, folosindu-se montajul reprezentat în figura 6.7, care conține și un galvanometru de vibrații sau o cască telefonică.

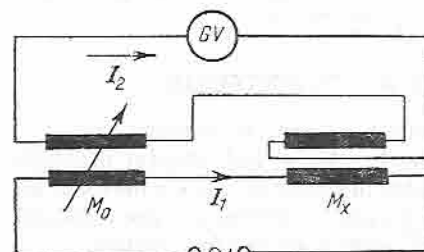


Fig. 6.7. Schema de măsurare a inductanței mutuale prin metoda comparației.

După cum se observă, înfășurările secundare ale celor două bobine sînt conectate diferențial. Se variază inductanța bobinei-etalon pînă cînd în circuitul secundar nu mai circulă curent. În această situație, galvanometrul de vibrații rămîne la zero (sau în casca telefonică nu se mai aude nimic) și inductanțele celor două bobine sînt egale.

Montajul permite măsurări numai pentru cazul în care inductanța mutuală necunoscută M_x este mai mică decît inductanța etalon M_0.

3. METODA CU COMPENSATOR CAMPBELL

Schema de montaj corespunde celei din figura 6.8, în care se folosește un condensator-etalon C_0, variabil, și un aparat indicator de zero (galvanometru sau o cască telefonică). Pentru măsurări se variază capacitatea condensatorului variabil C_0 pînă cînd indicatorul de zero arată lipsa curentului I_2, ca și în cazul metodei de la punctul precedent.

În acest caz rezultă:

$$M_X\omega = \frac{1}{C_0\omega},$$

de unde:

$$M_X = \frac{1}{\omega^2 C_0}. \tag{6.21}$$

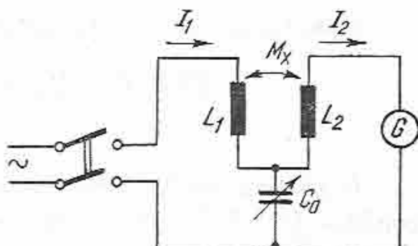


Fig. 6.8. Schema pentru măsurarea inductanțelor mutuale prin metoda compensatorului Campbell.

4. METODA CU PUNTE

Inductanțele mutuale se pot măsura și prin metoda cu punte, cu ajutorul schemei de montaj date în figura 6.9.

Măsurările comportă două etape, și anume:

— cu comutatoarele K_1 și K_2 pe poziția *1* se determină inductanța L_1 și rezistența R_1 (ca în fig. 6.4 — puntea Maxwell);

— se pun apoi comutatoarele K_1 și K_2 pe poziția *2*, introducîndu-se în circuit și cea de-a doua înfășurare a bobinei M_X. Se echilibrează puntea în curent alternativ, variindu-se simultan rezistențele R_3 și R_4, astfel încît să se păstreze condiția echilibrului în curent continuu, adică:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}.$$

Cînd puntea se echilibrează, căderile de tensiune în fiecare pereche de brațe AC și AD și, respectiv, CB și DB sînt egale, adică:

$$\underline{I}_1\underline{Z}_1 - j\omega M_X \underline{I}_1 = \underline{I}_2 R_2;$$

$$\underline{I}_1 R_3 = \underline{I}_2 R_4, \tag{6.22}$$

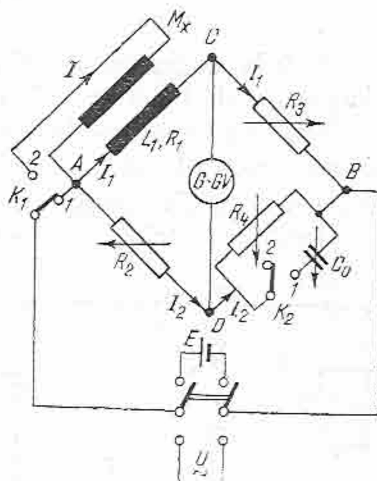


Fig. 6.9. Schema cu punte pentru măsurarea inductanțelor mutuale: R_2, R_3, R_4 — rezistențe variabile de precizie; C_0 — condensator etalon; M_X — bobină a cărei inductanță mutuală trebuie măsurată; L_1 și R_1 — inductanța proprie și rezistența uneia dintre cele două înfășurări ale bobinei M_X.

în care:

— $j\omega \underline{M}_X \underline{I}_1$ reprezintă tensiunea electromotoare indusă în înfășurarea a doua a bobinei M_X;

$\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1$ — impedanța primei înfășurări a bobinei M_X.

Ținîndu-se seamă de faptul că $\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2$, rezultă:

$$\underline{I}_1[R_1 + j\omega(L_1 - M_X)] = \underline{I}_2(R_2 + j\omega M_X);$$

$$\underline{I}_1 R_3 = \underline{I}_2 \cdot R_4, \tag{6.23}$$

Împărțindu-se între ele aceste ultime două relații și ținîndu-se seamă de condiția de echilibru în curent continuu ($R_1 R_4 = R_2 R_3$), se obține:

$$M_X = L_1 \frac{R_4}{R_3 + R_4}. \tag{6.24}$$

C. MĂSURAREA CAPACITĂȚILOR

Pentru determinarea capacităților pe cale experimentală există metode industriale și metode de laborator.

1. METODELE INDUSTRIALE

Metoda ampermetrului și a voltmetrului. Această metodă este cea mai simplă metodă industrială de măsurare a capacităților. Schema care trebuie realizată (fig. 6.10) cuprinde capacitatea de măsurat C, un ampermetru A și un voltmetru V, precum și un frecvențmetru F. Cu ajutorul comutatorului K se poate utiliza fie montajul aval, fie montajul amonte.

Pentru montajul aval, de exemplu, se deduce:

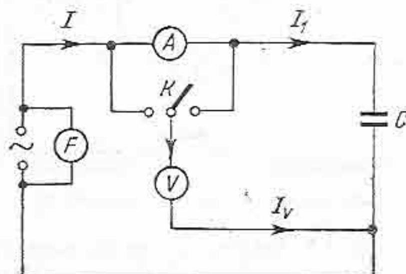


Fig. 6.10. Măsurarea capacității prin metoda ampermetrului și a voltmetrului.

$$C_X = \frac{I_1}{\omega U} = \frac{\sqrt{I^2 - I_V^2}}{\omega U}, \tag{6.25}$$

în care:

I este curentul măsurat de ampermetru;

I_V — curentul derivat prin bobina voltmetrului;

$\omega = 2\pi f$ — pulsația care se determină cu ajutorul frecvenței măsurate cu frecvențmetrul.

Dacă r_g reprezintă rezistența interioară a voltmetrului, atunci relația (6.25) devine:

$$C_X = \frac{\sqrt{I^2 - \frac{U^2}{r_g^2}}}{\omega U} = \frac{\sqrt{r_g^2 I^2 - U^2}}{r_g \omega U}. \qquad (6.26)$$

În cazul montajului amonte, capacitatea se deduce din indicațiile ampermetrului și ale voltmetrului, după cum urmează:

$$C_X = \frac{I_1}{\sqrt{U^2 - (R_A I_1)^2}}, \qquad (6.27)$$

în care R_A reprezintă rezistența interioară a ampermetrului.

Metoda ampermetrului și a voltmetrului este mai puțin precisă, deoarece se neglijează pierderile în dielectricul condensatorului. De aceea, ea se folosește numai la măsurarea capacităților mari.

Măsurarea capacității cu faradmetrul. Această metodă reprezintă una dintre posibilitățile rapide de determinare industrială a capacităților.

Faradmetrul (sau microfaradmetrul) este un aparat special, construit după principiul logometrelor electromagnetice. În figura 6.11 este reprezentată schema unui microfaradmetru ferodinamic, care conține două bobine fixe, B_1 și B_2, ale căror miezuri mobile de oțel sînt fixate pe același ax cu acul indicator. Bobina B_1 este înseriată cu capacitatea de măsurat C_x, iar bobina B_2, cu o capacitate-etalon C_0, montată chiar în interiorul aparatului. După cum se observă din figură, ansamblul bobină-condensator este legat în paralel la rețeaua de alimentare.

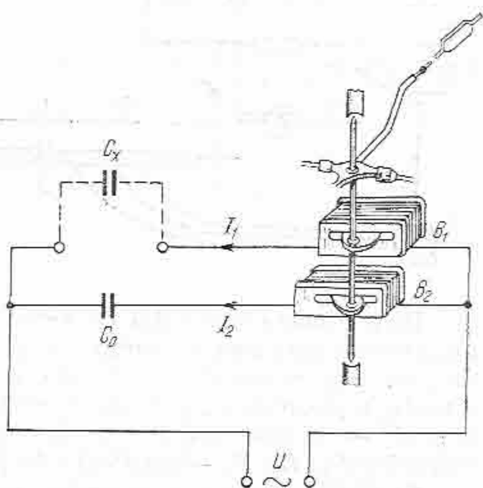


Fig. 6.11. Schema de principiu a microfaradmetrului ferodinamic.

Dacă se neglijează impedanțele bobinelor, în comparație cu capacitatea condensatoarelor celor două circuite, rezultă că curenții I_1 și I_2, care trec prin bobinele B_1 și B_2, se pot scrie sub forma:

$$I_1 \approx C_X \omega U; \qquad (6.28)$$

$$I_2 \approx C_0 \omega U. \qquad (6.29)$$

Cînd sistemul se află în echilibru, indicația aparatului va fi:

$$\alpha = f_1\left(\frac{I_1}{I_2}\right). \qquad (6.30)$$

Ținîndu-se seamă de relațiile (6.28) și (6.29) în (6.30), se obține:

$$\alpha = f_2\left(\frac{C_X}{C_0}\right) \qquad (6.31)$$

sau, ținîndu-se seamă că C_0 este constant, rezultă:

$$\alpha = f_3(C_X). \qquad (6.32)$$

Aşadar, deviaţia sistemului mobil, care este determinată de raportul dintre cei doi curenţi, este funcţie de capacitatea de măsurat.

De obicei, aparatul se construieşte cu două posibilităţi de măsurare, şi anume pentru valori de 1—2 μF şi de 5—10 μF, obţinute prin împărţirea uneia dintre bobine în două părţi, care pot fi conectate în serie sau în paralel.

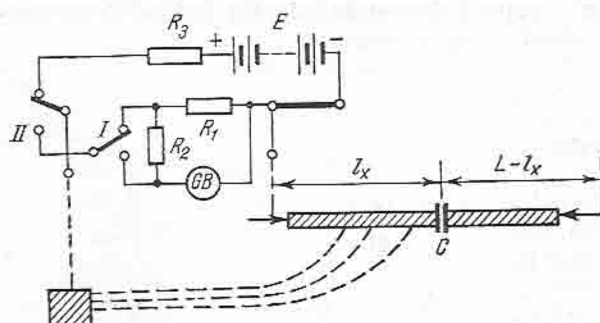


Fig. 6.12. Schemă pentru determinarea locului în care s-a rupt un cablu, prin măsurarea capacităţii.

Determinarea punctului de defect al unui cablu rupt. Această metodă presupune măsurarea capacităţii cablului, care este proporţională cu lungimea sa. Pentru aceasta se foloseşte schema de montaj din figura 6.12, în care *GB* reprezintă un galvanometru balistic, *E*—o baterie de acumulatoare, *I* şi *II* — comutatoare în circuitul galvanometrului şi al sursei electromotoare, iar R_1, R_2, R_3 — rezistenţe de protecţie şi de reglare.

Se vor face măsurări la ambele capete ale cablului, după cum urmează:

— se încarcă cablul de la sursa *E*, prin punerea întreruptoarelor *I* şi *II* în poziţiile care corespund cu cele din figură;

— se descarcă cablul în galvanometrul balistic, punîndu-se întreruptorul *II* în poziţia sa inferioară. În acest caz, galvanometrul va arăta o deviaţie α_1, proporţională cu capacitatea C_X a cablului, deci cu lungimea l_X;

— se repetă măsurarea la celălalt capăt al cablului şi se obţine la galvanometru deviaţia α_2, proporţională cu lungimea $L - l_X$.

Rezultă:

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{l_X}{L - l_X}, \tag{6.33}$$

de unde:

$$l_X = L \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}. \tag{6.34}$$

Întreruptorul *I* în poziţia inferioară corespunde sensibilităţii maxime a galvanometrului balistic *GB*.

2. METODE DE LABORATOR

Dintre metodele de laborator se vor aminti metoda galvanometrului balistic sau metoda comparaţiei şi metodele cu punte.

Metoda galvanometrului balistic. Această metodă se bazează pe compararea deviaţiilor unui galvanometru balistic produse prin descărcarea succe-

sivă în galvanometru a condensatorului de măsurat de capacitate C_X și a unui condensator-etalon de capacitate C_0, încărcate în prealabil de la o sursă de curent continuu.

Schema de montaj este cea din figura 6.13, în care E este sursa de tensiune electromotoare (o baterie de acumulatoare de 24 V), C_0 — capacitatea-etalon, C_X — capacitatea de măsurat, GB — galvanometrul balistic, iar K — un comutator cu godeuri cu mercur.

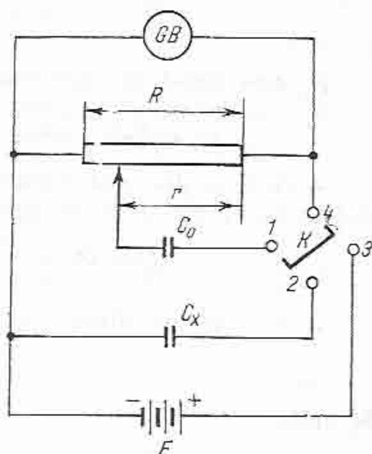


Fig. 6.13. Schemă pentru măsurarea capacităților prin metoda galvanometrului balistic.

Măsurarea se face astfel:

— cu comutatorul K pe poziția *1—3* se încarcă capacitatea-etalon C_0;

— cu comutatorul K mutat pe poziția *1—4* se descarcă capacitatea C_0 pe galvanometrul balistic și se obține o deviație α_0 proporțională cu cantitatea de electricitate, $\alpha_0 = \frac{Q_0}{C_0}$;

— cu comutatorul K pe poziția *2—3* se încarcă capacitatea C_X cu o cantitate de electricitate;

— cu comutatorul K, mutat pe poziția *2—4*, se descarcă capacitatea C_X pe galvanometrul balistic și se obține o deviație α_X proporțională cu cantitatea de electricitate, $\alpha_X = \frac{Q_X}{C_X}$.

Prin împărțirea celor două deviații obținute la galvanometru se determină:

$$\frac{Q_X}{Q_0} = \frac{\alpha_X}{\alpha_0} = \frac{C_X}{C_0}, \tag{6.35}$$

de unde reiese:

$$C_X = C_0 \frac{\alpha_X}{\alpha_0}. \tag{6.36}$$

În practică, deviațiile α_X și α_0 trebuie să aibă valori cît mai apropiate, pentru a nu se introduce erori de măsurare, datorită variației constantei galvanometrului balistic C_B în lungul scării gradate. Aceasta se poate realiza în diverse moduri.

Un prim mod de realizare este ca încărcarea capacităților C_0 și C_X, ale căror valori sînt mult diferite, să se facă de la surse de tensiuni electromotoare diferite.

Un al doilea mod, mai recomandabil, corespunde celui din schema de experimentare din figura 6.13, unde galvanometrul balistic este șuntat printr-o rezistență constantă R, iar legarea capacității de valoare mai mare se face la un punct variabil de pe această rezistență. În acest fel, la descărcarea capacității de valoare mai redusă (în cazul de față C_X), galvanometrul balistic este conectat în paralel cu întreaga rezistență R a șuntului, iar la descărcarea capacității mai mari (în cazul de față C_0), galvanometrul balistic este conectat în paralel numai cu o parte din rezistența de șunt, r. Prin variația rezistenței porțiunii de șunt r se pot obține deviații α_0 și α_X cît mai apropiate.

Modul de experimentare este cel indicat mai înainte, iar determinarea capacității necunoscute se face în felul următor:

— cînd se descarcă capacitatea-etalon pe galvanometrul balistic, cantitatea de electricitate este:

$$Q'_0 = Q_0 \frac{r}{R + R_g} = C_0 E \frac{r}{R + R_g} = C_B \cdot \alpha_0, \qquad (6.37)$$

în care:

R_g este rezistența galvanometrului balistic;

C_B — constanta galvanometrului balistic, care are aceeași valoare în ambele cazuri, deoarece α_X și α_0 sînt de valori apropiate;

— cînd se descarcă capacitatea necunoscută pe galvanometrul balistic, cantitatea de electricitate este:

$$Q'_X = Q_X \frac{R}{R + R_g} = C_X E \frac{R}{R + R_g} = C_B \cdot \alpha_X. \qquad (6.38)$$

Împărțindu-se ultimele două relații între ele, rezultă:

$$\frac{C_X R}{C_0 r} = \frac{\alpha_X}{\alpha_0},$$

de unde:

$$C_X = C_0 \frac{r}{R} \cdot \frac{\alpha_X}{\alpha_0}. \qquad (6.39)$$

Pentru mărirea preciziei, măsurarea se repetă de cîteva ori, calculîndu-se valoarea medie a rezultatelor obținute.

Metodele cu punte. Aceste metode au la bază montajul punților Wheatstone alimentate în curent alternativ (ca și în cazul inductanțelor). Ele folosesc ca instrument de zero fie un galvanometru de vibrații, dacă alimentarea se face în curent alternativ de 50 Hz, fie o cască telefonică, dacă alimentarea se face de la o sursă de audiofrecvență, de obicei de 1 000 Hz, care poate fi un generator electronic de oscilații sau un vibrator.

Capacitățile măsurate pot avea ca dielectric fie aerul, fie o substanță solidă.

În primul caz, dielectricul poate fi considerat ca avînd o rezistență teoretic infinită, iar capacitatea condensatorului are unghiul de pierderi egal cu zero (fără pierderi în dielectric). În cazul al doilea, dielectricul solid are o rezistență finită, deoarece sub influența tensiunii aplicate în el apar curenți de conducție (cu un curent de deplasare și pierderi prin histerezis dielectric). Ca urmare, într-un astfel de condensator, curentul nu poate fi decalat, cu 90° înainte față de tensiunea aplicată, ci cu unghiul $\varphi = 90 - \delta$, unde δ reprezintă unghiul de pierderi dielectrice. De aceea, în schemele echivalente (v. fig. 2.8), condensatorul real se poate reprezenta printr-o capacitate ideală C, conectată în paralel cu o rezistență R_d echivalentă pierderilor dielectrici, al căror unghi se determină cu relația:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{R_d C \omega}. \qquad (6.40)$$

Cu metodele cu punte se pot măsura atît capacitatea necunoscută C_x, cît și unghiul pierderilor dielectrice. În cele ce urmează se descriu montajele unor punți uzuale de laborator.

Puntea Sauty pentru măsurarea capacităților condensatoarelor fără pierderi în dielectric are schema de montaj dată în figura 6.14. Ea se compune din două rezistențe variabile de precizie, R_1 și R_2, condensatorul de măsurat C_x, condensatorul-etalon C_0 și un aparat indicator de zero, care în schemă este reprezentat printr-o cască telefonică T.

Echilibrul punții se poate realiza fie variindu-se capacitatea-etalon și păstrîndu-se constant raportul celor două rezistențe, fie invers.

Prima metodă se recomandă la măsurarea capacităților mici, pînă la 5 000 pF, cînd se ia ca etalon un condensator cu aer de capacitate variabilă; la măsurarea capacităților de valori mari se ia C_0 constant și se variază raportul $\frac{R_2}{R_1}$.

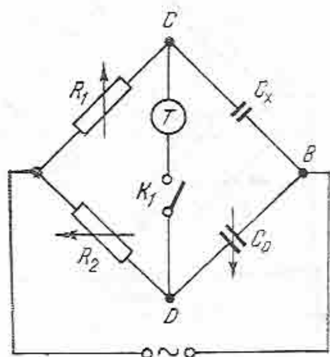


Fig. 6.14. Puntea Sauty pentru măsurarea capacității condensatoarelor fără pierderi în dielectric.

Prima condiție de echilibru a punții corespunde relației generale (6.5), care, aplicată în acest caz, ia forma:

$$\frac{R_1}{j\omega C_0} = \frac{R_2}{j\omega C_X}, \quad (6.41)$$

de unde se obține formula de calcul a capacității necunoscute:

$$C_X = C_0 \frac{R_2}{R_1}. \quad (6.42)$$

Cea de-a doua condiție de echilibru, rezultată din condiția generală dată de relația (6.7), arată că puntea din figura 6.14 se echilibrează numai atunci cînd ambele capacități nu au pierderi, adică $\varphi_0 = \varphi_X = 90°$ (în caz contrar este aproape imposibil ca φ_X să fie egal cu φ_0).

Puntea Sauty pentru măsurarea capacităților condensatoarelor cu pierderi în dielectric are schema de montaj dată în figura 6.15. În acest caz, condensatorul s-a reprezentat printr-o capacitate ideală C_X în serie cu rezistența pierderilor R_X (schema echivalentă serie).

Condiția generală de echilibru se pune, în acest caz, sub forma:

$$R_1\left(R_0 - \frac{j}{\omega C_0}\right) = R_2\left(R_X - \frac{j}{\omega C_X}\right), \quad (6.43)$$

de unde reiese, prin separarea părților reale de cele imaginare, că:

$$C_X = C_0 \cdot \frac{R_2}{R_1} \text{ și } R_X = R_0 \cdot \frac{R_1}{R_2}. \quad (6.44)$$

Tangenta unghiului de pierderi în condensator, conform relației (6.40), este:

$$\operatorname{tg} \delta_X = \omega C_X R_X = \omega C_0 R_0. \quad (6.45)$$

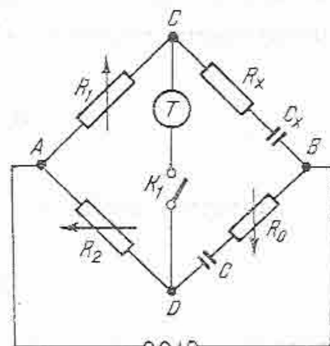


Fig. 6.15. Puntea Sauty pentru măsurarea capacității condensatoarelor cu pierderi în dielectric.

Puntea Shering este o punte specială, care permite ca măsurările să se facă sub tensiuni înalte, egale cu cele de lucru ale condensatorului a cărui capacitate C_X trebuie măsurată. Ea se utilizează pentru măsurarea capacităţii cablurilor de înaltă tensiune şi a pierderilor în dielectricul acestora, a transformatoarelor de curent, a izolatoarelor de trecere, a materialelor izolante etc.

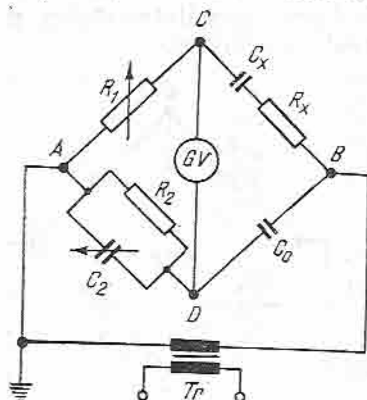


Fig. 6.16. Puntea Shering.

Schema de montaj a punţii Shering este reprezentată în figura 6.16 şi conţine următoarele elemente: C_X şi R_X — elementele condensatorului de măsurat, cu schemă echivalentă în serie; C_0 — condensator etalon de valoare fixă în aer (fără pierderi); R_1 — o rezistenţă de precizie, variabilă; R_2 — o rezistenţă fixă; C_2 — un condensator-etalon reglabil cu aer; GV — un galvanometru de vibraţii şi Tr — transformator de înaltă tensiune.

Prin punerea la pămînt a nodului A al punţii, elementele reglabile C_2 şi R_1 nu sînt supuse la tensiuni periculoase, putînd fi manipulate fără riscuri. Echilibrul punţii se realizează variindu-se succesiv rezistenţa R_1 şi condensatorul C_2, pînă la obţinerea deviaţiei minime la galvanometru.

Ţinîndu-se seamă de elementele înscrise în schema de montaj, rezultă că condiţia generală de echilibru în curent alternativ a punţii Shering este:

$$R_1 \cdot \frac{1}{j\omega C_0} = \frac{1}{\dfrac{1}{R_2} + j\omega C_2}\left(R_X + \frac{1}{j\omega C_X}\right), \tag{6.46}$$

de unde reies relaţiile (prin egalarea părţilor reale şi a celor imaginare) pentru determinarea rezistenţei şi a capacităţii necunoscute:

$$R_X = R_1 \frac{C_1}{C_0} \text{ şi } C_x = C_0 \frac{R_2}{R_1}. \tag{6.47}$$

Tangenta unghiului de pierderi dielectrice, conform relaţiei (6.40), este:

$$\mathrm{tg}\,\delta_X = \omega C_X R_X = \omega C_0 R_0. \tag{6.48}$$

Observaţie. Condiţiile de echilibru ale punţilor descrise (Sauty şi Shering) fiind independente de frecvenţă, pentru alimentarea lor se pot utiliza surse cu frecvenţe diferite.

REZUMAT

- *Măsurarea inductanțelor* se poate face prin:
  - metoda industrială (a ampermetrului și a voltmetrului);
  - metoda cu punte;
  - metoda comparației (Felici);
  - metoda cu compensator.
- *Măsurarea capacităților* se poate face prin:
  - metoda industrială;
  - metoda galvanometrului balistic;
  - metoda cu punte (Shering).

ÎNTREBĂRI RECAPITULATIVE

1. *În cîte moduri este influențată valoarea măsurată a unei inductanțe de frecvența tensiunii rețelei, în cazul aplicării metodei industriale?*
2. *Idem, în cazul aplicării punții Maxwell?*
3. *Care sînt condițiile de echilibrare ale punții Wheatstone în curent alternativ?*
4. *La măsurarea inductanțelor și a capacităților prezintă importanță forma sinusoidală sau deformată a tensiunii aplicate?*
5. *Valoarea unei capacități măsurate este influențată de valoarea rezistenței de pierderi a condensatorului?*

CAPITOLUL 7

MĂSURAREA PUTERII ELECTRICE

A. MĂSURAREA PUTERII ÎN CURENT CONTINUU

Măsurarea puterii în curent continuu constă în măsurarea cu ampermetrul şi voltmetrul a curentului I şi a tensiunii U, al căror produs determină puterea P. Din cauza consumului de putere al celor două instrumente trebuie să se aducă corecţii funcţie de montajul utilizat. Schema de măsurare se poate realiza cu montajul aval şi cu montajul amonte.

În montajul aval reprezentat în figura 7.1, voltmetrul V se conectează, în derivaţie, direct la bornele receptorului a cărui putere P urmează a fi măsurată, iar ampermetrul A măsoară curentul I care însumează curentul absorbit de receptor şi curentul i absorbit de voltmetru.

Puterea consumată de receptor este dată de relaţia:

$$P = U(I - i) = U\left(I - \frac{U}{r_V}\right) = UI - \frac{U^2}{r_V}, \tag{7.1}$$

în care r_V este rezistenţa interioară a voltmetrului.

Puterea debitată de sursă este dată de relaţia:

$$P_d = (U + r_A I)I = UI + r_A I^2, \tag{7.2}$$

în care r_A este rezistenţa interioară a ampermetrului.

În montajul amonte, reprezentat în figura 7.2, ampermetrul măsoară curentul absorbit de receptor, iar voltmetrul măsoară tensiunea receptorului, plus căderea de tensiune în ampermetru ($u = r_A I$).

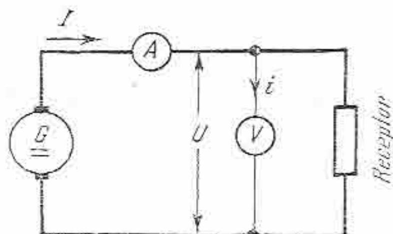


Fig. 7.1. Schemă pentru măsurarea puterii în curent continuu, cu ampermetrul şi voltmetrul (montajul aval).

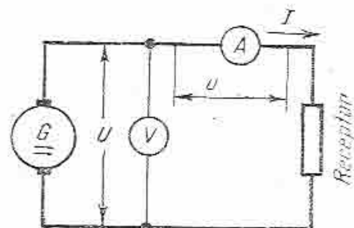


Fig. 7.2. Schemă pentru măsurarea puterii în curent continuu, cu ampermetrul şi voltmetrul (montajul amonte).

Puterea consumată este dată de relația:

$$P = (U - u)\,I = (U - r_A I)\,I = UI - r_A I^2, \tag{7.3}$$

iar puterea debitată de sursă este dată de relația:

$$P_d = U\left(I + \frac{U}{r_V}\right) = UI + \frac{U^2}{r_V}. \tag{7.4}$$

Cu cît puterea măsurată este mai mare, cu atît erorile sistematice de metodă datorate voltmetrului și ampermetrului, $\frac{U^2}{r_V}$ și $r_A I^2$, sînt mai neglijabile.

Puterea în curent continuu se poate măsura și cu wattmetrul, însă metoda este complicată, necesitînd mai multe determinări pentru obținerea unui rezultat corect, neinfluențat de cîmpul magnetic terestru.

B. MĂSURAREA PUTERII ACTIVE ÎN CURENT ALTERNATIV MONOFAZAT

În acest caz se folosesc fie wattmetre electrodinamice (pentru curent continuu sau curent alternativ), fie wattmetre de tip de inducție (numai pentru curent alternativ), ultimele fiind utilizate în special ca aparate pentru panouri electrice.

1. UTILIZAREA WATTMETRULUI ELECTRODINAMIC PENTRU MĂSURĂRI DE PUTERI MONOFAZATE

Sensul indicației wattmetrului. Pentru obținerea unei indicații corecte a aparatului prin devierea acului său în sensul scării trebuie respectat sensul curenților în bobine. În acest scop, bornele de intrare a curentului în bobina de curent, respectiv în bobina de tensiune a wattmetrului, sînt marcate pe aparate și pe schemă cu un semn distinctiv (o steluță). Racordarea wattmetrului trebuie să se facă astfel încît unul dintre conductoarele de alimentare să fie legate la borna marcată (polarizată) a bobinei de curent, iar borna marcată a bobinei de tensiune să fie legată la același conductor.

În cele expuse mai sus, sensul curentului trebuie înțeles numai prin modul în care sînt raportate pozițiile celor doi fazori, U și I.

Montajul wattmetrului. Poate fi un montaj aval sau amonte, după cum borna marcată a bobinei de tensiune este legată la borna marcată sau la borna nemarcată a bobinei de curent, așa cum se observă în figura 7.3.

Indicația wattmetrului. Dacă U este valoarea efectivă a tensiunii alternative aplicată bobinei de tensiune, I valoarea efectivă a curentului nominal de aceeași frecvență din bobina de curent, φ defazajul dintre $\underline{U}$ și $\underline{I}$, iar K o constantă, indicația wattmetrului este proporțională cu produsul acestor mărimi:

$$\alpha = KUI\cos\varphi, \tag{7.5}$$

adică este proporțională cu puterea activă.

Scara wattmetrului electrodinamic are gradaţia uniformă.

Constanta wattmetrului. Wattmetrele se construiesc de obicei astfel încît la $\cos \varphi = 1$, deviaţia maximă α_n să corespundă la o anumită intensitate nominală I_n şi o anumită tensiune nominală U_n.

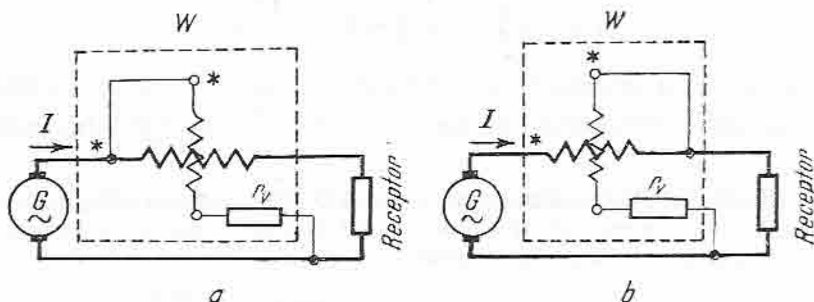


Fig. 7.3. Scheme pentru măsurarea puterii active în curent alternativ monofazat:

a — montaj aval; *b* — montaj amonte.

Constanta wattmetrului K' este coeficientul cu care trebuie multiplicată indicaţia citită în diviziuni, pentru aflarea puterii în waţi. Cu alte cuvinte, constanta este puterea corespunzătoare unei diviziuni a scării şi se determină din relaţia:

$$U_n I_n = K' \alpha_n;$$

$$K' = \frac{U_n I_n}{\alpha_n}. \qquad (7.6)$$

De exemplu: dacă wattmetrul are 100 de diviziuni şi este construit pentru $U_n = 220$ V, un curent $I_n = 10$ A, la $\cos \varphi = 1$ constanta sa va fi:

$$K' = \frac{220 \cdot 10}{100} = 22 \text{ W},$$

adică o diviziune corespunde la 22 W.

Erorile în măsurarea puterii monofazate. Ca şi în cazul măsurării puterii în curent continuu, prin metoda ampermetrului şi a voltmetrului se pot comite şi aici erori sistematice de măsurare, din cauza consumurilor proprii ale bobinelor wattmetrului.

În scopul determinării puterii monofazate reale se montează în circuitul de măsurare un ampermetru şi un voltmetru, cu care se determină curentul şi tensiunea la bornele receptorului.

În *montajul amonte* al bobinei de tensiune a wattmetrului (fig. 7.4), puterea P_m măsurată de wattmetru este egală cu suma puterilor tuturor circuitelor al căror curent trece şi prin bobina de curent a wattmetrului, adică:

$$P_m = P + \frac{U^2}{r_V} + r_A I_1^2, \qquad (7.7)$$

în care:

P este puterea receptorului $UI \cos \varphi$;

$\frac{U^2}{r_V}$ — consumul de putere al voltmetrului;

$r_A I_1^2$ — consumul de putere în bobina de curent a wattmetrului, I_1 fiind curentul care trece efectiv prin această bobină;

r_A — rezistența bobinei.

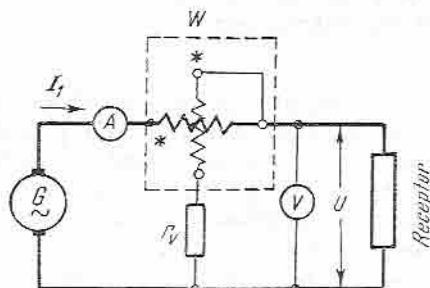


Fig. 7.4. Schemă pentru determinarea puterii active monofazate, în montaj amonte.

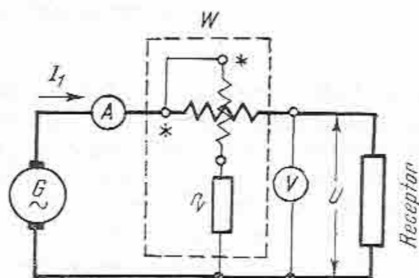


Fig. 7.5. Schemă pentru determinarea puterii active monofazate, în montaj aval.

Rezultă că puterea reală a receptorului este:

$$P = P_m - \frac{U^2}{r_V} - r_A I_1^2. \tag{7.8}$$

Corecția $\frac{U^2}{r_V}$ poate fi calculată imediat, deoarece U este tensiunea măsurată de voltmetru, iar r_V este, de obicei, scrisă pe aparat.

Pentru corecția $r_A I_1^2$ se poate, în general, considera că $r_A I_1^2 = r_A I^2$, în care I este curentul dat de ampermetru, iar r_A — rezistența bobinei de curent scrisă pe aparat.

În *montajul aval* al bobinei de tensiune a wattmetrului (fig. 7.5), puterea măsurată de wattmetru P_m este egală cu suma puterilor tuturor circuitelor care se găsesc în derivație cu bobina de tensiune, inclusiv puterea consumată de această bobină:

$$P_m = P + \frac{U^2}{R} + \frac{U^2}{r_V}, \tag{7.9}$$

în care:

P este puterea receptorului;

$\frac{U^2}{R}$ — consumul de putere în bobina de tensiune a wattmetrului, R fiind rezistența acestei bobine;

$\frac{U^2}{r_V}$ — consumul de putere a voltmetrului.

Rezultă că puterea reală a receptorului este:

$$P = P_m - \frac{U^2}{R} - \frac{U^2}{r_V}. \tag{7.10}$$

Termenii $\frac{U^2}{R}$ şi $\frac{U^2}{r_V}$ din relaţia (7.10) se calculează uşor, deoarece U este dat de voltmetru, iar R şi r_V sînt valori scrise pe aparate.

Ca şi în curent continuu, şi în acest caz corecţiile capătă importanţă atunci cînd se măsoară puteri mici.

2. UTILIZAREA WATTMETRULUI PRIN INTERMEDIUL TRANSFORMATOARELOR DE MĂSURARE

Wattmetrele se construiesc pentru valori limitate ale curentului şi ale tensiunii. Din acest motiv, atunci cînd sînt necesare măsurări ale puterii în circuite care prezintă valori ale curentului şi ale tensiunii ce depăşesc valorile-limite constructive ale aparatelor, se folosesc transformatoare de măsurare, de curent şi de tensiune, care reduc curentul în bobina de curent a wattmetrului la maximum 5A, iar tensiunea la valoarea de 100V.

Folosirea transformatoarelor de măsurare este legată de următoarele avantaje importante:

— separarea galvanică a circuitelor de curent şi tensiune, separare care la folosirea tensiunilor înalte este obligatorie din punctul de vedere al protecţiei muncii;

— unificarea domeniilor de măsurare a aparatelor folosind în exclusivitate curentul de 5 A (eventual 1 A) şi tensiunea de 100 V, diversificarea aparatelor respective făcîndu-se numai prin adoptarea unei scări adecvate (de exemplu, scara este gradată 0—1 000 A cu specificaţia că raportul de transformare este 1 000/5 A).

Montarea wattmetrului prin intermediul transformatoarelor de măsurare poate fi efectuat în trei moduri:

— montajul numai cu transformator de curent;

— montajul numai cu transformator de tensiune;

— montajul cu transformator de curent şi transformator de tensiune.

În montajul cu transformator de curent, bobina de curent a wattmetrului este legată de secundarul transformatorului, bobina de tensiune fiind legată la reţea în derivaţie (fig. 7.6). Bornele primare şi secundare ale transformatorului de curent sînt notate cu K, L, respectiv k şi l.

Borna polarizată a bobinei de curent a wattmetrului se leagă la borna k a transformatorului. Borna polarizată a bobinei de tensiune se leagă la conductorul reţelei, fie la borna K (montaj amonte), fie la borna L (montaj aval). În acelaşi timp se execută o legătură şi între bornele K (primar) şi k (secundar) ale transformatorului de curent, în scopul aducerii bobinei de curent la acelaşi potenţial cu bobina de tensiune.

În montajul cu transformator de tensiune, bobina de tensiune a wattmetrului este legată pe secundarul transformatorului de tensiune, bobina de curent fiind legată în serie, direct cu reţeaua (fig. 7.7).

Bornele primare şi secundare ale transformatorului de tensiune sînt notate cu U, V, respectiv cu u, v. Borna U a primarului se leagă la conductorul reţelei, legat cu borna polarizată a bobinei de curent a wattmetrului, iar borna secundară u se leagă la borna polarizată a bobinei de tensiune.

Bornele U și u ale transformatorului de tensiune se leagă între ele în scopul obținerii aceluiași potențial între bobina de curent și cea de tensiune.

Atît în cazul montajului cu transformator de curent (fig. 7.6), cît și în cazul montajului cu transformator de tensiune (fig. 7.7), legarea bornelor $K-k$, respectiv $U-u$, este admisă numai pentru măsurări ce se execută la joasă tensiune.

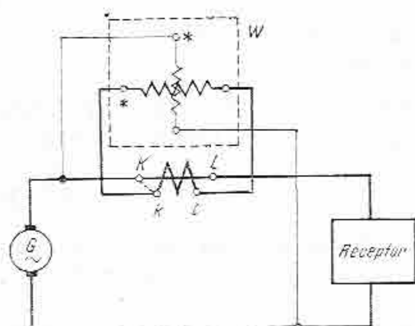


Fig. 7.6. Schema de montare a wattmetrului cu transformator de curent.

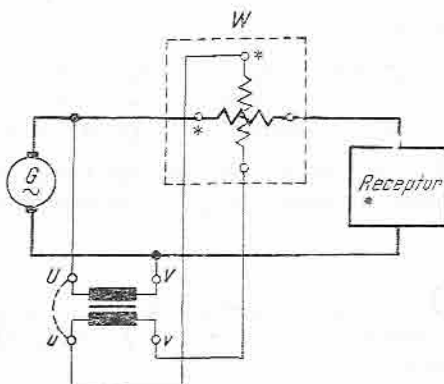


Fig. 7.7. Schema de montare a wattmetrului cu transformator de tensiune.

În montajul cu transformator de curent și transformator de tensiune, bobina de curent a wattmetrului se leagă la un transformator de curent, iar cea de tensiune la un transformator de tensiune, așa cum este indicat în figura 7.8.

Ca măsură de protecție, bornele secundare k și u se leagă între ele și, împreună, la pămînt. Prin această legătură se obține și o diferență de potențial nulă între bobinele wattmetrului.

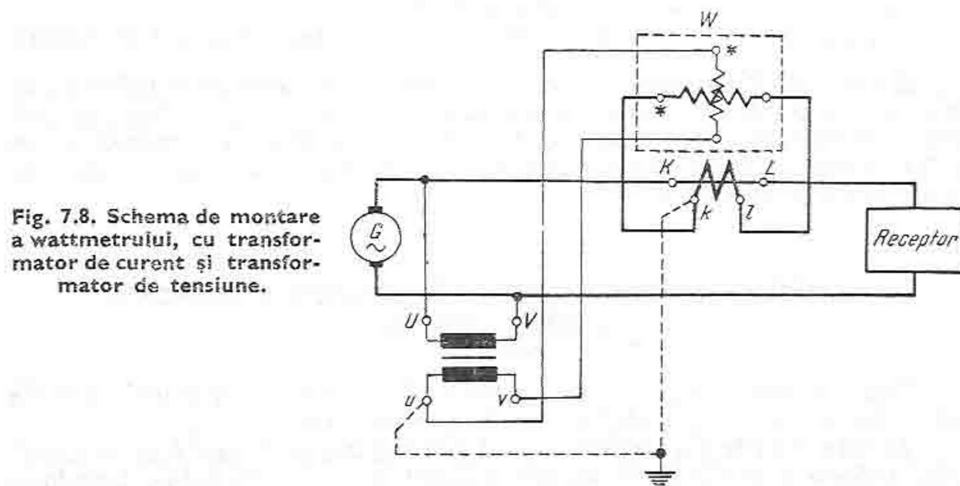


Fig. 7.8. Schema de montare a wattmetrului, cu transformator de curent și transformator de tensiune.

3. CONSTANTA WATTMETRULUI MONTAT PRIN INTERMEDIUL TRANSFORMATOARELOR DE MĂSURARE

În cazul în care wattmetrul este montat prin intermediul unui transformator de curent, puterea P_m măsurată de wattmetru va fi:

$$P_m = kK_i\alpha, \tag{7.11}$$

în care:

k este constanta wattmetrului;
K_i — raportul de transformare al transformatorului de curent;
α — indicația în diviziuni a wattmetrului.

În cazul în care wattmetrul este montat prin intermediul unui transformator de tensiune, care are raportul de transformare K_u, puterea măsurată va fi:

$$P_m = kK_u\alpha. \tag{7.12}$$

În cazul montajului prin intermediul ambelor transformatoare cu rapoartele de transformare K_i, respectiv K_u, puterea măsurată de wattmetru va fi:

$$P_m = kK_iK_u\alpha. \tag{7.13}$$

C. MĂSURAREA PUTERII ACTIVE ÎN CURENT ALTERNATIV TRIFAZAT

În curent alternativ trifazat, puterea activă este dată de relația generală:

$$P = U_{10}I_1 \cos \varphi_{10} + U_{20}I_2 \cos \varphi_{20} + U_{30}I_3 \cos \varphi_{30}, \tag{7.14}$$

în care:

U_{10}, U_{20}, U_{30} reprezintă tensiunile pe fază;
I_1, I_2, I_3 — curenții pe fază;
$\varphi_{10}, \varphi_{20}, \varphi_{30}$ — unghiurile de defazaj între tensiuni și curenți.

Această relație demonstrează că într-un circuit alternativ trifazat puterea activă rezultă ca o sumă a puterilor active de pe fiecare fază, și deci pentru măsurarea ei pot fi folosite trei wattmetre. Măsurarea puterii active trifazate poate fi efectuată și cu un număr mai mic de wattmetre, așa cum se va arăta în continuare.

1. MĂSURAREA PUTERII ACTIVE ÎN CIRCUITELE TRIFAZATE FĂRĂ FIR NEUTRU

Pentru măsurarea puterii se vor indica două metode, și anume metoda celor trei wattmetre și metoda celor două wattmetre.

Metoda celor trei wattmetre constă în montarea pe fiecare fază a circuitului trifazat a cîte unui wattmetru, conductoarele de alimentare legîndu-se

la bornele polarizate (marcate) ale bobinelor de curent, iar bornele polarizate ale bobinelor de tensiune legîndu-se la aceleași conductoare ca și bobinele de curent. În figura 7.9 este reprezentat un astfel de montaj. Punctul comun O al bobinelor de tensiune se lasă liber, el putînd avea orice potențial.

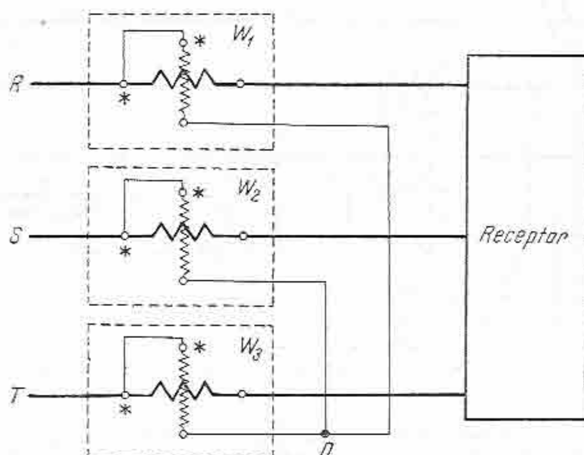


Fig. 7.9. Schema pentru măsurarea puterii active în circuite trifazate (metoda celor trei wattmetre).

Dacă P_1, P_2 și P_3 sînt indicațiile celor trei wattmetre, puterea trifazată a rețelei este reprezentată de suma celor trei puteri măsurate:

$$P = P_1 + P_2 + P_3. \tag{7.15}$$

Punctul comun O al bobinelor de tensiune se poate lega, în cazul unui receptor trifazat în stea, care are punctul neutru accesibil, la acest punct neutru. În acest caz, bobinele de tensiune ale wattmetrelor sînt alimentate la tensiunile pe fază. Într-un astfel de montaj (fig. 7.10), fiecare wattmetru indică exact puterea care corespunde fiecărei faze.

În situația în care este necesar ca wattmetrele să fie montate prin intermediul transformatoarelor de măsurare, schema de montaj va fi cea din figura 7.11.

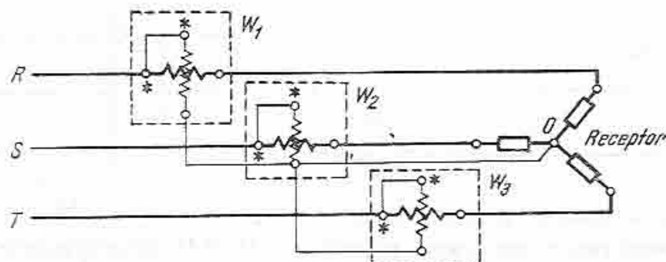


Fig. 7.10. Schema pentru măsurarea puterii active, cu trei wattmetre, în circuitele trifazate legate în stea și cu neutrul accesibil.

Un caz particular îl prezintă circuitele trifazate simetrice ca tensiuni și echilibrate ca curenți. În astfel de circuite, tensiunile aplicate bobinelor de tensiune sînt tensiunile pe fază ale rețelei, egale între ele ca valoare efectivă, iar curenții care străbat bobinele de curent sînt de asemenea egali.

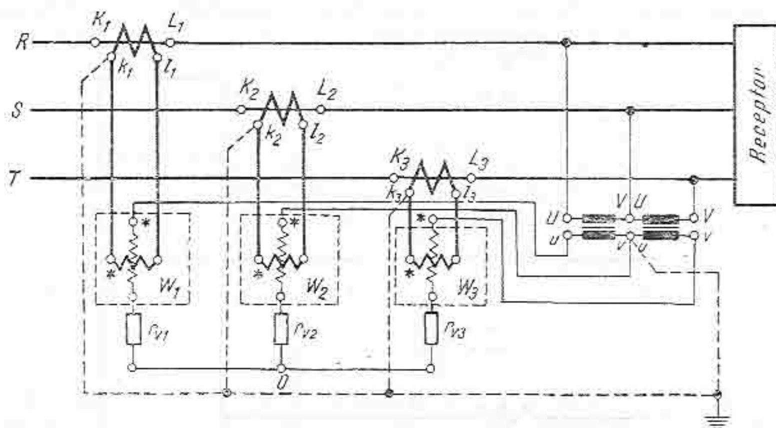


Fig. 7.11. Schemă pentru măsurarea puterii active cu trei wattmetre, în circuitele trifazate, prin intermediul transformatoarelor de curent.

Puterile indicate de cele trei wattmetre vor fi deci și ele egale ($P_1 = P_2 = P_3$), iar puterea trifazată în acest caz poate fi determinată de un singur wattmetru, ea reprezentînd:

$$P = 3 \cdot P_1. \tag{7.16}$$

În aceste condiții, dacă punctul neutru al stelei este accesibil, montarea wattmetrului se face conform celor indicate în figura 7.12.

Dacă punctul neutru al stelei nu este accesibil sau dacă consumatorul este legat în triunghi, este necesar să se creeze un punct neutru artificial, ce se realizează prin două rezistențe adiționale, R_2 și R_3, egale ca valoare cu rezistența totală R_1 a bobinei de tensiune a wattmetrului W, inclusiv rezistența adițională a acestuia (fig. 7.13).

Practic, astfel de wattmetre monofazate, avînd scara gradată direct pentru a indica puterea trifazată, se utilizează pentru măsurarea puterii motoarelor

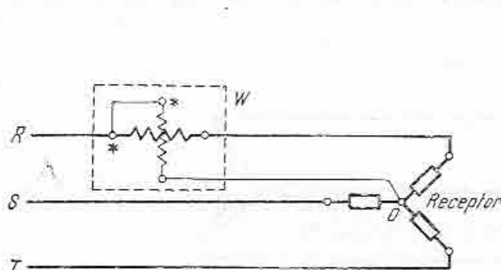


Fig. 7.12. Schemă pentru măsurarea puterii active cu un singur wattmetru în circuitele trifazate cu sarcini echilibrate și neutrul accesibil.

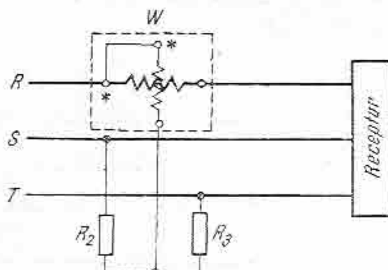


Fig. 7.13. Schemă pentru măsurarea puterii active, cu un singur wattmetru în circuitele trifazate, cu sarcini echilibrate și cu neutrul inaccesibil.

sincrone și asincrone. Ele sînt dotate cu o cutie de rezistențe adiționale, care cuprind și rezistențele adiționale ale bobinei de tensiune a wattmetrului, pentru formarea punctului neutru O.

Metoda celor două wattmetre este folosită în circuitele trifazate nesimetrice, în care valorile curenților și ale tensiunilor diferitelor faze, ca și unghiurile de defazaj între ele, nu sînt identice (sarcina este neuniform distribuită pe cele trei faze).

Dacă, în cazul metodei celor trei wattmetre, punctul comun O al bobinelor de tensiune se leagă la una dintre faze, denumită fază de referință, wattmetrul de pe această fază nu mai dă nici o indicație și poate fi eliminat din montaj (fig. 7.14).

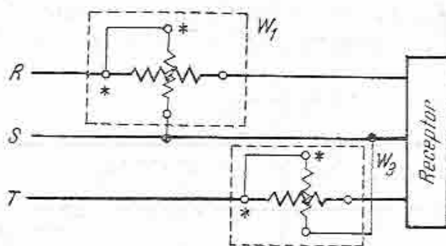


Fig. 7.14. Schemă pentru măsurarea puterii active, cu două wattmetre, în circuitele trifazate cu sarcini echilibrate.

Bobinele de tensiune ale celor două wattmetre W_1 și W_3 sînt supuse tensiunilor dintre faze, U_{RS} (dintre fazele R și S) și U_{TS} (dintre fazele T și S).

Puterea trifazată este reprezentată de suma algebrică a puterilor măsurate de cele două wattmetre, adică:

$$P = P_1 + P_3 = U_{RS}I_R \cos(\widehat{U_{RS}I_R}) + U_{TS}I_T \cos(\widehat{U_{TS}I_T}). \qquad (7.17)$$

În toate cazurile, puterea trifazată reprezintă suma algebrică a celor două puteri măsurate de wattmetre. Această specificare este motivată de faptul că unul dintre wattmetre poate să dea indicații negative, în funcție de caracterul sarcinii (de exemplu, în cazul sarcinilor capacitive). În aceste cazuri, pentru a se putea citi valorile negative ale puterii, se inversează legăturile la bornele bobinei de tensiune.

Pentru ușurarea măsurării prin metoda celor două wattmetre s-au construit comutatoare wattmetrice. Astfel, se poate folosi un singur wattmetru prevăzut cu comutator wattmetric. Cu ajutorul acestui comutator, bobina de curent a wattmetrului se conectează succesiv pe două faze, fără a se întrerupe circuitul.

De asemenea, au fost construite wattmetre duble, compuse din două elemente wattmetrice, care sînt cuplate mecanic respectînd conectarea prin metoda celor două wattmetre.

Montarea celor două wattmetre prin intermediul transformatoarelor de măsură este reprezentată în figura 7.15.

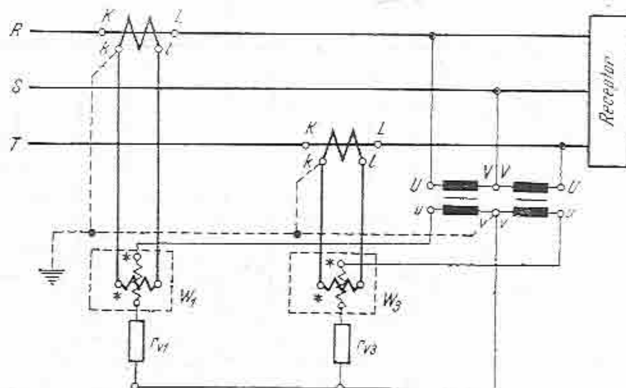


Fig. 7.15. Schemă pentru măsurarea puterii active, cu două wattmetre, în circuitele trifazate, cu sarcini echilibrate, prin intermediul transformatoarelor de măsură.

2. MĂSURAREA PUTERII ACTIVE ÎN CIRCUITELE TRIFAZATE CU FIR NEUTRU

În astfel de circuite se utilizează metoda celor trei wattmetre, montate ca în figura 7.16, în care bobinele de curent sînt parcurse de curenții I_R, I_S, I_T, iar bobinele de tensiune, ce sînt montate între fazele respective și firul neutru, sînt supuse tensiunilor pe fază U_{R0}, U_{S0}, U_{T0}.

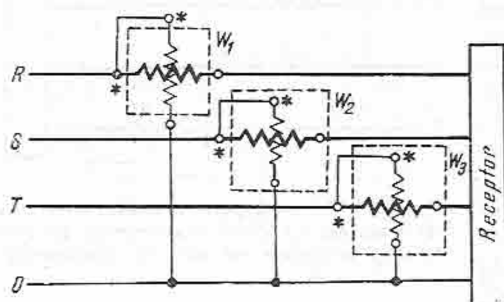


Fig. 7.16. Schemă pentru măsurarea puterii active, cu trei wattmetre, în circuitele trifazate cu neutrul accesibil.

Puterile indicate de cele trei wattmetre reprezintă puterile consumate pe fiecare fază în parte, iar puterea trifazată va fi suma lor:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = U_{R0} I_R \cos(\widehat{U_{R0} I_R}) + U_{S0} I_S \cos(\widehat{U_{S0} I_S}) + U_{T0} I_T \cos(\widehat{U_{T0} I_T}). \quad (7.18)$$

La sarcini inductive, puterile P_1, P_2 și P_3 sînt totdeauna pozitive, iar wattmetrele indică în sensul normal.

În figura 7.17 s-a reprezentat schema de montaj a celor trei wattmetre, prin intermediul transformatoarelor de măsurare.

Din cele relatate la paragrafele precedente rezultă că la circuitele trifazate fără fir neutru este de preferat metoda celor două wattmetre pentru măsurarea puterii, iar la cele cu fir neutru — metoda celor trei wattmetre.

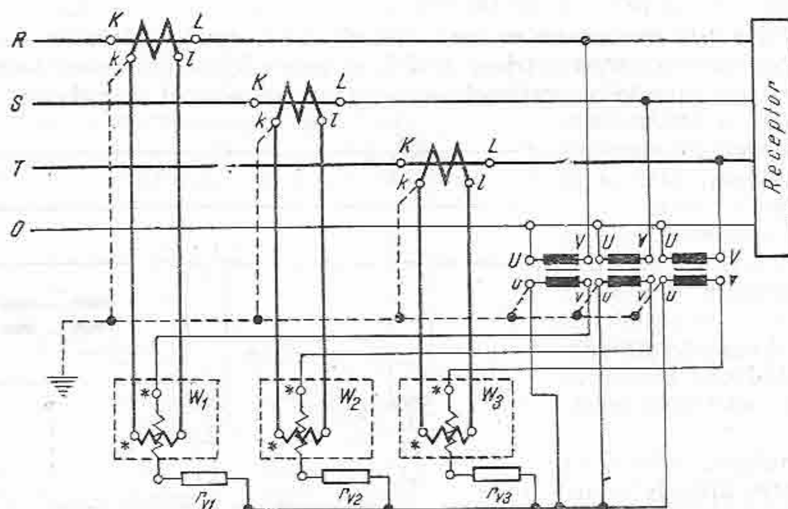


Fig. 7.17. Schemă pentru măsurarea puterii active cu trei wattmetre, în circuitele trifazate, cu neutrul accesibil, prin intermediul transformatoarelor de măsură.

3. WATTMETRE TRIFAZATE

În vederea ușurării măsurărilor puterii active s-au construit wattmetre trifazate care se utilizează în general în circuitele trifazate de înaltă tensiune. Ele sînt compuse din două wattmetre monofazate, avînd bobinele de tensiune cuplate pe același ax, asupra căruia acționează cuplurile datorate celor două wattmetre. Indicațiile aparatelor sînt direct proporționale cu puterea trifazată.

Un astfel de aparat, folosit la tablourile de comandă din stațiile de transformare, are șapte borne de racord, cîte două pentru fiecare bobină de curent și trei borne pentru bobinele de tensiune.

Montarea unui wattmetru de tablou W prin intermediul transformatoarelor de măsurare este indicată în figura 7.18.

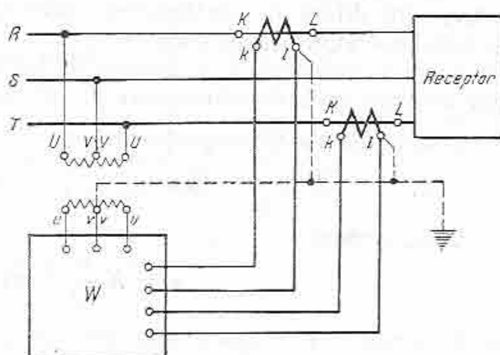


Fig. 7.18. Schemă pentru măsurarea puterii active, cu un wattmetru trifazat, în circuitele trifazate, prin intermediul transformatoarelor de măsură.

D. MĂSURAREA PUTERII REACTIVE

Puterea reactivă se poate măsura prin două metode: indirectă și directă.

1. MĂSURAREA INDIRECTĂ A PUTERII REACTIVE

Dacă se măsoară puterea activă P cu ajutorul unui wattmetru și puterea aparentă S cu voltmetrul și ampermetrul, atunci puterea reactivă Q se poate calcula cu relația:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}. \tag{7.19}$$

Această metodă se poate aplica numai în cazul circuitelor monofazate și trifazate simetrice și echilibrate.

În circuitele monofazate, din măsurarea tensiunii U, a curentului I și a puterii $P = UI \cos \varphi$, rezultă:

$$Q = \sqrt{(UI)^2 - P^2}. \tag{7.20}$$

În circuitele trifazate, folosindu-se metoda celor două wattmetre, se determină puterea $P = P_1 + P_2$, tensiunea U între faze și curentul I pe fază și rezultă:

$$Q = \sqrt{(\sqrt{3}UI)^2 - (P_1 + P_2)^2}. \tag{7.21}$$

Aceste măsurări nu sînt însă în general precise, datorită numărului mare de aparate folosite, care introduc consumuri, ale căror corecții sînt destul de greu de făcut.

2. MĂSURAREA DIRECTĂ A PUTERII REACTIVE

Măsurarea puterii reactive prin metoda directă se face cu varmetre sau wattmetre.

Măsurarea puterii reactive monofazice cu varmetrul electrodinamic. Varmetrele nu diferă de wattmetrele obişnuite decît prin faptul că au bobina de tensiune montată în serie cu o inductanţă L, foarte mare (fig. 7.19, *a*), astfel încît curentul I în bobina de tensiune să fie decalat la 90° în urmă faţă de tensiunea de alimentare U. În aceste condiţii, deviaţia varmetrului electrodinamic va fi proporţională cu produsul $II' \cos(\widehat{II'})$, în care:

$$I' = \frac{U}{\omega L}, \text{ iar } \cos(\widehat{II'}) = \cos(90° - \varphi) = \sin \varphi. \tag{7.22}$$

Prin urmare:

$$\alpha = K \frac{U}{\omega L} I \sin \varphi = \frac{K}{\omega L} Q,$$

adică deviaţia α a aparatului este proporţională cu puterea reactivă $Q = UI \sin \varphi$.

În locul inductanţei L se poate monta în serie cu bobina de tensiune o capacitate C (fig. 7.19, *b*), obţinîndu-se în acest caz:

$$\alpha = K\omega CUI \sin \varphi = K\omega CQ. \tag{7.23}$$

Pentru a se înlătura influenţa frecvenţei reţelei faţă de frecvenţa nominală a aparatului, s-au construit varmetre compensate, avînd două bobine de tensiune cuplate pe acelaşi ax, una fiind în serie cu o inductanţă, iar cealaltă în serie cu o capacitate (fig. 7.19, *c*).

La acest tip de varmetru, deviaţia α este:

$$\alpha = K\left[\frac{1}{\omega L} + \omega C\right] Q. \tag{7.24}$$

În situaţia în care la o anumită valoare a lui L şi C se îndeplineşte condiţia $LC\omega_0^2 = 1$, în care ω_0 este pulsaţia pentru care s-a construit aparatul, indicaţiile varmetrului sînt foarte puţin influenţate de frecvenţa reţelei.

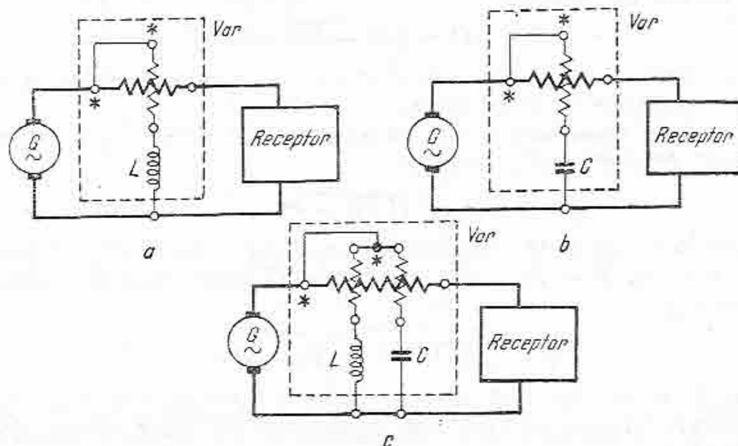


Fig. 7.19. Scheme de principiu a diferitelor tipuri de varmetre.

Ca şi la wattmetre, la racordarea varmetrului se ţine seama de aceleaşi reguli privind polaritatea bobinei de curent şi de tensiune.

Varmetrul indică în sens normal, dacă decalajul dintre U şi I este inductiv, şi în sens invers, dacă decalajul este capacitiv.

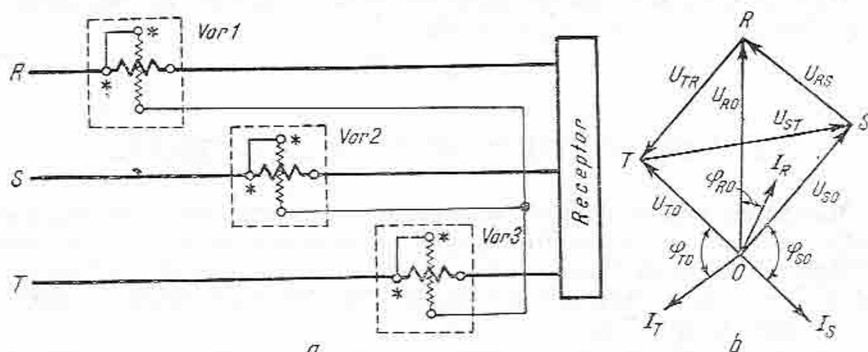


Fig. 7.20. Schemă pentru măsurarea puterii reactive cu trei varmetre, în circuitele trifazate (a) şi diagrama fazorială a unui sistem trifazat nesimetric şi dezechilibrat (b).

Măsurarea puterii reactive trifazate cu varmetrul. Se pot utiliza, în cazul reţelelor trifazate fără fir neutru, două metode de măsurare:

— metoda cu trei varmetre;

— metoda cu două varmetre.

În *metoda cu trei varmetre*, schema de montaj şi diagrama fazorială sînt reprezentate în figura 7.20.

Dacă U_{RS}, U_{ST} şi U_{TR} sînt tensiunile dintre faze; O — un punct oarecare al potenţialelor; I_R, I_S şi I_T — curenţii pe cele trei faze, între care există relaţia: $I_R + I_S + I_T = 0$; U_{R0}, U_{S0} şi U_{T0} — diferenţele de potenţial dintre conductoarele R, S şi T, iar φ_{R0}, φ_{S0} şi φ_{T0} — defazajele dintre tensiunile U_{R0}, U_{S0} şi U_{T0} faţă de curenţii I_R, I_S şi I_T, atunci, oriunde s-ar afla punctul O, expresia:

$$Q = U_{R0} I_R \sin \varphi_{R0} + U_{S0} I_S \sin \varphi_{S0} + U_{T0} I_T \sin \varphi_{T0} \tag{7.25}$$

va rămîne constantă şi reprezintă puterea totală reactivă aferentă receptorului respectiv.

În *metoda cu două varmetre*, schema de montaj este reprezentată în figura 7.21.

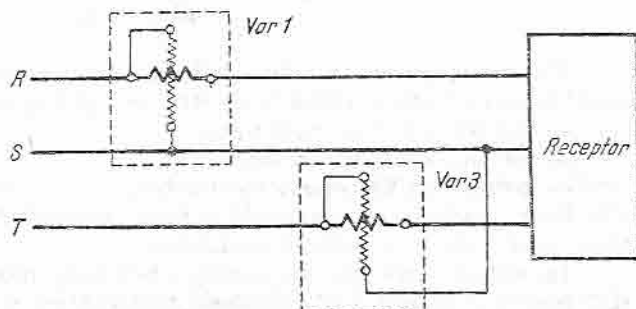


Fig. 7.21. Schemă pentru măsurarea puterii reactive, cu două varmetre, în circuitele trifazate fără fir neutru.

Puterea reactivă trifazată are valoarea:

$$Q = U_{RS} I_R \sin(\widehat{U_{RS} I_R}) + U_{TS} I_T \sin(\widehat{U_{TS} I_T}). \tag{7.26}$$

Dacă Q_1 şi Q_3 sînt valorile puterilor reactive indicate de cele două varmetre Var_1 şi Var_3, atunci se obţine:

$$Q = Q_1 + Q_3. \tag{7.27}$$

3. MĂSURAREA PUTERII REACTIVE CU WATTMETRUL

Măsurarea puterii reactive monofazate cu wattmetrul. Această metodă se utilizează numai în condiţii speciale, alimentîndu-se bobina de tensiune a wattmetrului, nu cu tensiunea U a receptorului, ci cu o altă tensiune auxiliară U_1, de aceeaşi frecvenţă, dar decalată cu 90° înainte sau în urmă faţă de tensiunea U (fig. 7.22).

Wattmetrul va măsura o putere activă P_1, dată de tensiunea U_1 şi curentul I, adică:

$$P_1 = U_1 I \cos(\widehat{U_1 I}) = U_1 I \cos(90° - \varphi) = U_1 I \sin \varphi,$$

şi deci wattmetrul va măsura o putere activă P_1, care este proporţională cu puterea reactivă $Q = UI \sin \varphi$, a cărei valoare va fi:

$$Q = P_1 \frac{U}{U_1}. \tag{7.28}$$

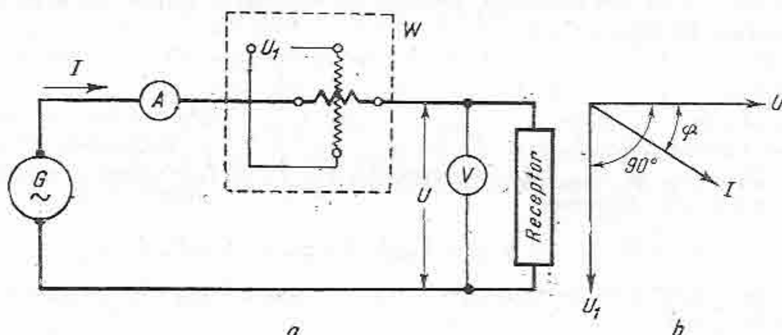


Fig. 7.22. Schemă pentru măsurarea puterii reactive, cu un singur wattmetru, într-un circuit monofazat *(a)* şi diagrama fazorială respectivă *(b)*.

Măsurarea puterii reactive trifazate cu wattmetrul. Se pot utiliza, în cazul reţelelor trifazate fără fir neutru, trei metode de măsurare:

— metoda cu trei wattmetre;
— metoda cu două wattmetre;
— metoda cu un singur wattmetru.

Prima metodă este valabilă pentru circuitele trifazate cu tensiuni simetrice între faze şi curenţi dezechilibraţi.

În *metoda celor trei wattmetre*, schema de montaj şi diagrama fazorială sînt redate în figura 7.23. Expresia matematică se deduce din relaţia (7.25),

ţinîndu-se seamă că punctul neutru O se alege chiar în centrul triunghiului echilateral al tensiunilor dintre faze:

$$Q = U_{R0}I_R \sin(\widehat{U_{R0}I_R}) + U_{S0}I_S \sin(\widehat{U_{S0}I_S}) + U_{T0}I_T \sin(\widehat{U_{T0}I_T}), \qquad (7.29)$$

deci:

$$Q = Q_R + Q_S + Q_T. \qquad (7.30)$$

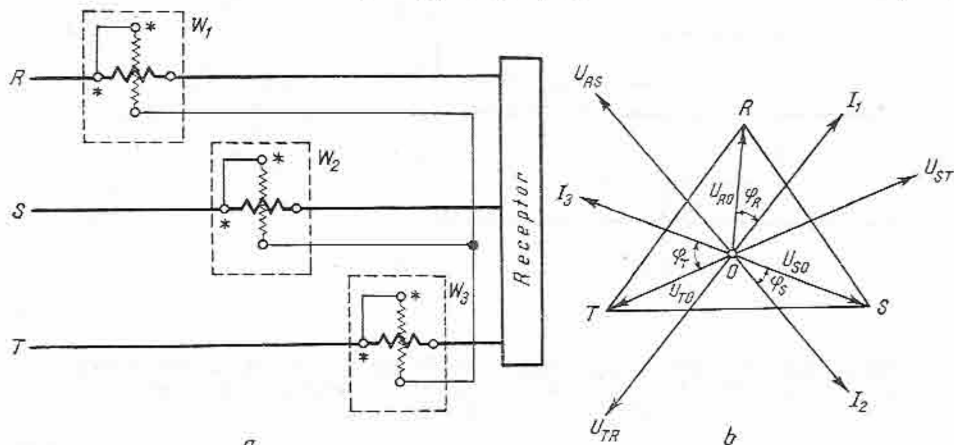


Fig. 7.23. Schema pentru măsurarea puterii reactive, cu trei wattmetre, în circuite trifazate, cu tensiuni simetrice şi curenţi dezechilibraţi (a) şi diagrama fazorială respectivă (b).

Înlocuindu-se puterile reactive Q_1, Q_2 şi Q_3 prin puterile active echivalente — date de tensiunile auxiliare U_{ST}, U_{TR} şi U_{RS}, decalate cu 90° în urmă faţă de tensiunile simple U_R, U_S şi U_T, cu curenţii I_1, I_2 şi I_3 — se obţine:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}}[U_{ST}I_R \cos(\widehat{U_{ST}I_R}) + U_{TR}I_S \cos(\widehat{U_{TR}I_S}) + U_{RS}I_T \cos(\widehat{U_{RS}I_T})].$$

Dacă P_1, P_2 şi P_3 sînt puterile indicate de cele trei wattmetre W_1, W_2 şi W_3, atunci:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}}(P_1 + P_2 + P_3). \qquad (7.31)$$

În *metoda celor două wattmetre*, schema de montaj şi diagrama fazorială sînt redate în figura 7.24.

Formulele se deduc pornindu-se de la relaţia (7.26):

$$Q = U_{RS}I_R \sin(\widehat{U_{RS}I_R}) + U_{TS}I_T \sin(\widehat{U_{TS}I_T}).$$

Înlocuindu-se puterile reactive Q_1 şi Q_2 prin puterile active echivalente date de tensiunile auxiliare $- U_T$, respectiv $+ U_R$, decalate cu 90° în urmă faţă de tensiunile U_{RS}, respectiv U_{TS} — cu curenţii I_R respectiv I_T, se obţine relaţia:

$$Q = \sqrt{3}[- U_T I_R \cos(\widehat{U_T I_R}) + U_R I_T \cos(\widehat{U_R I_T})]. \qquad (7.32)$$

Se creează un punct neutru artificial N, cu ajutorul unei rezistențe R_2, egală ca valoare cu fiecare dintre rezistențele R_1 și R_3 ale bobinelor de tensiune (inclusiv rezistențele adiționale) ale celor două wattmetre.

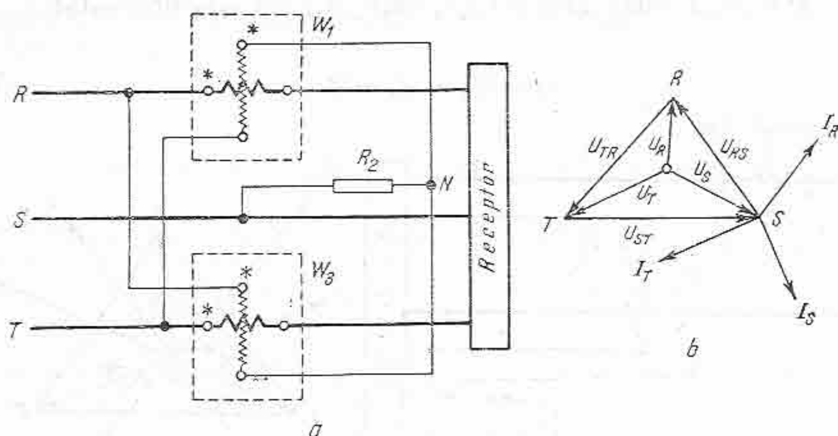


Fig. 7.24. Schemă pentru măsurarea puterii reactive cu două wattmetre în circuitele trifazate cu tensiuni simetrice și curenți dezechilibrați (a) și diagrama fazorială respectivă (b).

Avîndu-se în vedere și modul în care sînt executate legăturile (la borne polarizate și nepolarizate), dacă P_1 respectiv P_3 sînt puterile măsurate de cele două wattmetre, puterea reactivă trifazată Q va fi:

$$Q = \sqrt{3}(P_1 + P_3), \quad (7.33)$$

una dintre puteri putînd fi și negativă.

Metoda cu un singur wattmetru poate fi utilizată numai în cazul circuitelor trifazate cu tensiuni și curenți simetrici.

Puterea reactivă poate fi măsurată cu wattmetrul W, montat conform figurii 7.25, pe baza următoarei relații:

$$Q = \sqrt{3}Q_1, \quad (7.34)$$

în care Q este puterea reactivă absorbită, iar Q_1 — puterea indicată de wattmetru.

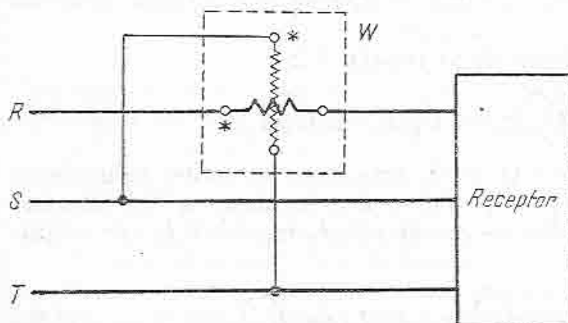


Fig. 7.25. Schemă pentru măsurarea puterii reactive, cu un singur wattmetru, în circuitele trifazate, cu tensiuni simetrice între faze și curenți echilibrați.

REZUMAT

- *Măsurarea puterii electrice active*

  în curent continuu
  - cu voltmetrul și ampermetrul
  - cu voltmetrul

  în curent alternativ
  - monofazat
    - direct
    - prin transformatoare de măsurare
  - trifazat
    - cu un wattmetru
    - cu două wattmetre
    - cu trei wattmetre
    - cu un wattmetru trifazat

- *Măsurarea puterii electrice reactive*
  - monofazat
    - indirectă
    - directă
  - trifazat
    - cu unul, cu două sau cu trei varmetre
    - cu unul, cu două sau cu trei wattmetre

ÎNTREBĂRI RECAPITULATIVE

1. *În ce condiții se poate aplica metoda de măsurare a puterii active folosind un singur wattmetru?*
2. *Idem, două wattmetre?*
3. *Idem, trei wattmetre?*
4. *Măsurarea puterii active și reactive impune condiții asupra frecvenței rețelei electrice?*

C A P I T O L U L 8

MĂSURAREA ENERGIEI ELECTRICE

Energia electrică activă W produsă sau consumată într-un interval de timp t *reprezintă produsul dintre puterea activă P și timpul respectiv:*

$$W = Pt. \tag{8.1}$$

Aceasta în condițiile în care puterea activă nu își modifică valoarea, în tot intervalul t. Altfel, relația (8.1) devine:

$$W = P\,\mathrm{d}t. \tag{8.2}$$

Similar celor expuse mai sus, **energia electrică reactivă** W_r, produsă sau consumată într-un interval de timp t, *reprezintă produsul dintre puterea reactivă Q și timpul respectiv:*

$$W_r = Qt. \tag{8.3}$$

Și această relație este valabilă, de asemenea, în condițiile în care puterea electrică reactivă nu își modifică valoarea în intervalul de timp t. Altfel, relația (8.3) devine:

$$W_r = Q\,\mathrm{d}t. \tag{8.4}$$

Din relațiile (8.1) pînă la (8.4) rezultă că aparatele care înregistrează energia electrică trebuie să măsoare simultan puterea activă sau reactivă a circuitului și timpul în care se produce sau se consumă puterea electrică corespunzătoare. Astfel de aparate se numesc *contoare*.

A. CLASIFICAREA CONTOARELOR ELECTRICE

Contoarele electrice se pot clasifica după mai multe criterii.

După natura curentului, contoarele pot fi: de curent continuu și de curent alternativ (monofazate și trifazate).

După locul de măsurare a energiei electrice în sistemul energetic (fig. 8.1) se deosebesc:

— contoare pentru măsurarea energiei electrice produse de generatoare (*1*);

— contoare pentru măsurarea consumului de energie electrică la consumatori (*4*);

— contoare pentru măsurarea energiei electrice care trece într-un timp determinat printr-un anumit punct al instalațiilor de transportat sau de distribuție a energiei electrice (*2*);

— contoare pentru măsurarea pierderilor în anumite instalații (contoare de $\int I^2 dt$) (*3*);

— contoare pasante, ori pentru determinarea consumului unui subconsumator, ori pentru determinarea consumului specific electric realizat fie de un anumit proces tehnologic, fie de o anumită secție de producție a unui consumator (*5*).

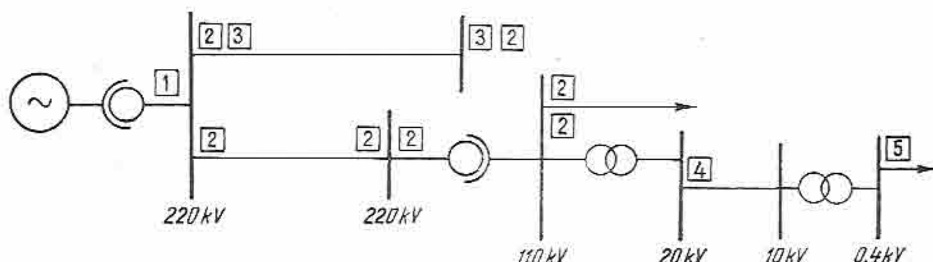


Fig. 8.1. Puncte de măsurare a energiei electrice într-un sistem electroenergetic.

După natura energiei măsurate, se deosebesc:

— contoare de energie activă sau wattorămetre;

— contoare de energie reactivă sau varorămetre;

— contoare de cantitate de electricitate sau amperorămetre.

După principiul de funcționare se deosebesc:

— contoare electrodinamice, utilizate aproape exclusiv în curent continuu;

— contoare de inducție, utilizate în curent alternativ;

— contoare magnetoelectrice, utilizate de asemenea în curent alternativ.

După sistemul de tarifare aplicat se deosebesc:

— contoare pentru tarif unic, utilizate cînd energia electrică se vinde cu un același tarif;

— contoare cu tarif dublu, utilizate cînd, pe perioada unei zile, energia electrică este vîndută la două tarife diferite, în intervale de timp diferite, în funcție de vîrful de sarcină al sistemului energetic; contorul are două cadrane și un ceas de comutare, care face să treacă înregistrarea, la orele fixate, de la un cadran la altul;

— contoare cu tarif triplu, care are trei cadrane, fiecare înregistrînd pe perioada unei zile, alternativ, o energie electrică tarifată mai ieftin (în golul de noapte), o energie electrică tarifată normal (în cursul zilei) și o energie electrică tarifată mai scump (la orele de vîrf de sarcină ale sistemului energetic);

— contoare de vîrf, care se utilizează în cazul în care energia electrică este vîndută global pînă la o anumită putere, absorbită, iar pentru o putere superioară limitei stabilite, consumată accidental, contorul înregistrează numai această cantitate de energie electrică;

— contoare de depășire, analoage cu cele de vîrf, cu deosebirea însă că ele înregistrează și energia electrică consumată pînă la puterea limită stabilită, avînd deci două cadrane de înregistrare;

— contoare cu plata prealabilă, care funcționează prin introducerea unor monede și mențin circuitul închis înspre abonat atîta timp cît contorul

înregistrează o cantitate de energie electrică echivalentă valorii monedei introduse;

— contoare cu indicator de maximum, care înregistrează atît energia consumată, cît și puterea maximă absorbită medie într-un timp determinat (de exemplu, un sfert de oră); tarifarea se va efectua după energia electrică totală consumată și o taxă fixă, după puterea maximă absorbită.

După modul de afișare a valorii mărimii măsurate se deosebesc:

— contoare indicatoare;

— contoare înregistratoare.

După sistemul de montaj se deosebesc:

— contoare montate direct la circuitele primare ale instalației;

— contoare montate indirect, prin intermediul transformatoarelor de măsură, la instalația respectivă.

B. MĂSURAREA ENERGIEI ELECTRICE ÎN CIRCUITELE DE CURENT CONTINUU

Măsurarea energiei electrice în circuitele de curent continuu se face în general cu contoare de tip electrodinamic.

Construcția și principiul de funcționare al acestui contor sînt asemănătoare cu cele ale wattmetrului electrodinamic. Deosebirea constructivă dintre ele constă în faptul că la contor unghiul de rotație al echipajului mobil nu este limitat, acesta putîndu-se roti continuu. Lipsesc de asemenea, acul indicator și scara gradată, în locul acestora contorul fiind prevăzut cu un mecanism integrator (sumator) și o transmisie cu șurub-melc.

Indusul va fi supus unui cuplu activ M_a determinat de relația:

$$M_a = K'UI = K'P.$$

Deci cuplul activ M_a este proporțional cu puterea receptorului, cuplu care va pune în mișcare indusul, întocmai ca și indusul unui motor. Într-un disc de aluminiu al aparatului, care se rotește în întrefierul unui magnet permanent, se nasc curenți de inducție care, împreună cu fluxul magnetului permanent, dau naștere unui cuplu de frînare antagonist M_r, care va fi proporțional cu viteza unghiulară ω sau cu numărul de rotații pe secundă N ale discului. Deci:

$$M_r = K_1\omega = K_2N. \tag{8.5}$$

Cînd cele două cupluri devin egale, mișcarea de rotație a indusului devine uniformă, obținîndu-se următoarea relație de funcționare a contorului:

$$M_a = M_r; \quad K'P = K_2N; \quad P = K_3N, \tag{8.6}$$

adică puterea P a receptorului este proporțională cu numărul de rotații pe secundă N. Integrîndu-se ambii membri ai relației (8.6) într-un interval de timp t de funcționare a contorului se obține valoarea energiei electrice:

$$W = \int_0^t P\,\mathrm{d}t = K_3\int_0^t N\,\mathrm{d}t = K''n, \tag{8.7}$$

în care n este numărul de rotații executat de discul aparatului în timpul t. Astfel, energia electrică consumată de receptor în timpul t este proporțională cu numărul de rotații n, efectuat în acest timp de către contor.

Constanta contorului K'' ține seamă de relația dintre numărul de rotații și energia electrică, astfel încît indicatorul contorului înregistrează, în mod normal, direct energia electrică transmisă prin punctul respectiv, într-un timp determinat.

C. MĂSURAREA ENERGIEI ELECTRICE ÎN CIRCUITELE DE CURENT ALTERNATIV

Pentru măsurarea energiei active în circuitele de curent alternativ se folosesc exclusiv contoarele de inducție monofazate sau trifazate, după natura circuitului.

1. CONTORUL DE INDUCȚIE MONOFAZAT

Principiul de funcționare. În figura 8.2 este reprezentată construcția generală a acestui contor care are următoarele elemente componente:

— un electromagnet de curent, format dintr-un miez de fier B și o bobină de curent AA', legată în serie cu receptorul;

— un electromagnet de tensiune, format dintr-un miez de oțel D și o bobină de tensiune C, legată în derivație cu receptorul;

— un disc de aluminiu E, așezat astfel încît să fie străbătut de fluxurile Φ_I și Φ_U ale celor doi electromagneți, iar discul este legat de axul F, care la rîndul său are la un capăt un șurub-melc G, care pune în mișcare, prin rotirea discului de aluminiu E, rotițele I, care sînt în legătură cu dispozitivul de înregistrare K;

— un magnet permanent H, între ale cărui brațe se află o parte din discul de aluminiu E.

Electromagnetul de curent B, al cărui circuit magnetic este în formă de U, are bobina de curent AA', prin care trece curentul de utilizare I și care este împărțită în două jumătăți egale (fig. 8.3,a). O parte Φ_1 din fluxul Φ_I produs traversează de două ori discul de aluminiu în două sensuri diferite, închizîndu-se prin aer și parțial prin circuitul electromagnetului, cealaltă parte Φ_1'

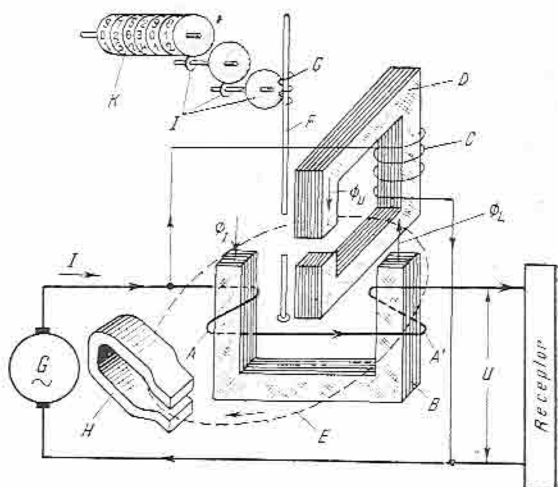


Fig. 8.2. Contor de inducție monofazat.

închizîndu-se printr-un şunt magnetic. Fluxul Φ_I este proporţional cu curentul I şi decalat în urmă faţă de acesta cu un mic unghi φ_1. Pe o porţiune orizontală a electromagnetului, se găseşte o înfăşurare de cîteva spire, închisă pe o mică rezistenţă A, formată din două fire de nichel pe care alunecă un cursor şi al cărui rost este acela de a varia decalajul φ_1.

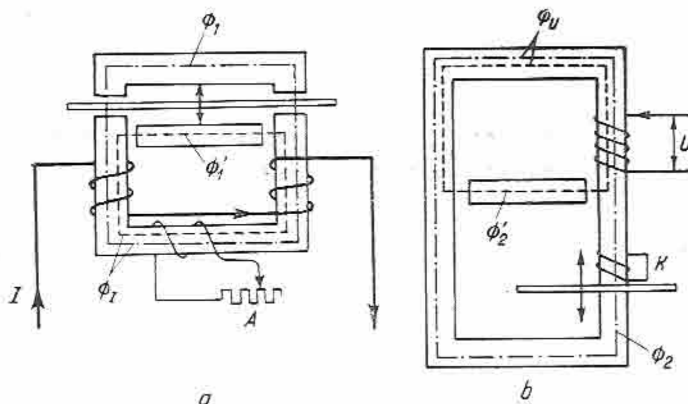


Fig. 8.3. Electromagnetul de curent (*a*) şi electromagnetul de tensiune (*b*) ale unui contor.

Electromagnetul de tensiune (D din fig. 8.2), al cărui circuit magnetic este de obicei de forma indicată în figura 8.3, *b*, comportă un şunt magnetic şi un întrefier, bobina de excitaţie fiind alimentată în derivaţie de tensiunea U la bornele receptorului.

Din fluxul Φ_U produs de această tensiune, o parte Φ_2' trece prin şuntul magnetic, iar restul fluxului activ Φ_2 traversează discul de aluminiu la egală distanţă între cele două fluxuri ale bobinei de curent.

Pe partea circuitului magnetic de deasupra discului se găseşte o înfăşurare auxiliară K de cîteva spire, închisă în scurtcircuit.

Principiul de funcţionare a contorului este următorul: Fluxurile active Φ_1 şi Φ_2 ale celor doi electromagneţi, traversînd discul, produc în acesta curenţi de inducţie (Foucault), I_1 şi I_2 proporţionali cu fluxurile Φ_1, respectiv Φ_2, al căror traseu este indicat în figura 8.4. Din acţiunea reciprocă a fluxurilor Φ_1, respectiv Φ_2, asupra curenţilor I_2, respectiv I_1, se produce asupra discului o forţă F, de direcţia arătată în figura 8.4, care dă naştere unui cuplu de rotaţie, a cărui valoare — întocmai ca şi la celelalte aparate de inducţie — are expresia:

$$M_a = kf\Phi_1\Phi_2 \sin(\widehat{\Phi_1\Phi_2}), \tag{8.8}$$

în care f este frecvenţa curentului de alimentare, sau, pentru frecvenţă constantă:

$$M_a = K\Phi_1\Phi_2 \sin(\widehat{\Phi_1\Phi_2}),$$

acest cuplu punînd discul în mişcare, în sensul arătat de săgeată (fig. 8.4).

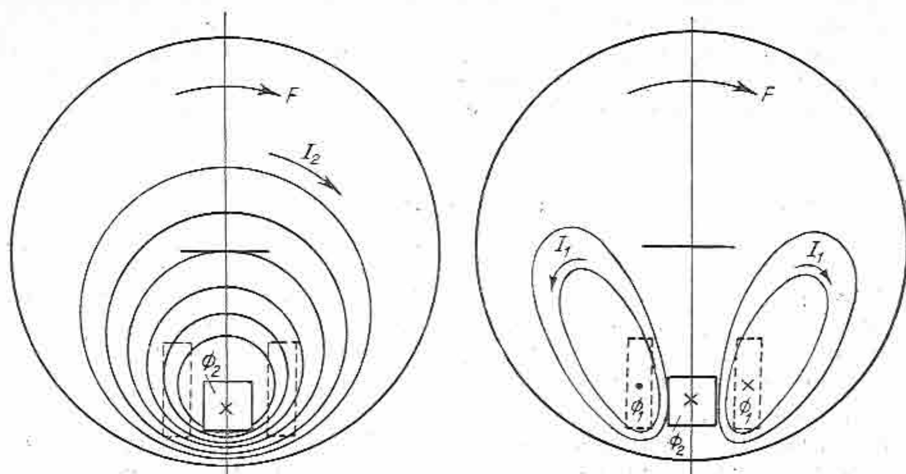


Fig. 8.4. Principiul de funcționare a contorului de inducție.

Fluxul Φ_1 fiind proporțional cu curentul de utilizare I ($\Phi_1 = K_1 I$) și decalat în urmă față de acesta cu un mic unghi φ_1 (fig. 8.5), iar fluxul Φ_2 proporțional cu tensiunea de alimentare $U (\Phi_2 = K_2 U)$, și decalat față de aceasta cu un unghi β, în general mai mic decît 90°, valoarea cuplului capătă expresia:

$$M_a = KK_1 IK_2 U \sin(\widehat{\beta - \varphi - \varphi_1}) = K'UI \sin(\beta - \varphi - \varphi_1). \tag{8.9}$$

Cu ajutorul șuntului magnetic al electromagnetului de tensiune (care mărește inductivitatea circuitului de tensiune) și cu ajutorul spirelor în scurtcircuit (al căror efect — datorită curenților de inducție care se nasc în acestea, și deci al fluxului auxiliar pe care-l provoacă — este de a contribui la decalarea și mai mult în urmă față de tensiunea U a fluxului Φ_2 al bobinei de tensiune) se determină unghiul β de decalaj între acestea la valoarea de:

$$\beta = 90° + \varphi_1.$$

Cu această condiție, relația (8.9) a cuplului activ va căpăta forma:

$$M = K'UI \sin(90° + \varphi_1 - \varphi - \varphi_1) =$$
$$= K'UI \sin(90° - \varphi) =$$
$$= K'UI \cos \varphi = K'P. \tag{8.10}$$

Cuplul activ este deci proporțional cu puterea solicitată de receptor, întocmai ca și la contorul de curent continuu, cu a cărui funcționare, de aici înainte, se aseamănă întocmai.

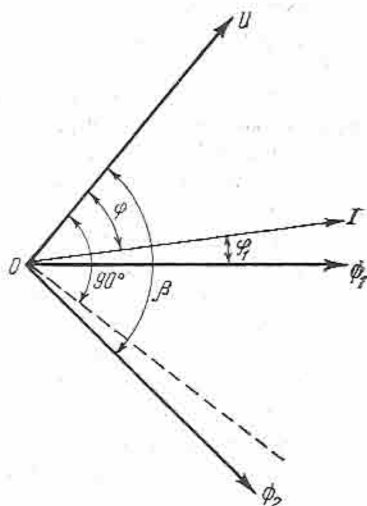


Fig. 8.5. Diagrama vectorială a unui contor de inducție monofazat.

Discul, rotindu-se în întrefierul unui magnet permanent, este supus unui cuplu antagonist M_r, proporţional cu numărul de rotaţii pe secundă $M_r = K''N$. Cînd cele două cupluri devin egale, $M_a = M_r$, mişcarea de rotaţie a discului devine uniformă, obţinîndu-se relaţia de funcţionare:

$$K'P = K''N,$$

din care, prin integrare în timpul t, se obţine relaţia finală:

$$W = K_0 n, \tag{8.11}$$

adică *energia electrică activă W consumată în timpul t este proporţională cu numărul de rotaţii n efectuat de contor în acest interval de timp.*

Contorul de inducţie este influenţat de temperatura mediului înconjurător şi de variaţia frecvenţei şi a tensiunii.

Clasele de precizie ale contoarelor de inducţie sînt 2,5 şi 2 pentru tarifarea energiei electrice la consumatori şi 1 pentru măsurarea energiei electrice produse în centralele electrice sau pentru măsurarea energiei electrice consumate de marii consumatori industriali sau pentru verificări uzinale. Consumul propriu al contoarelor este de 0,5—3 W, iar curentul de pornire este de 0,3—0,5% din curentul nominal.

Construcţia contorului monofazat de inducţie. Constructiv, contorul monofazat de inducţie de tip CAM 6 de fabricaţie românească este format din elementele următoare (fig. 8.6): A este bobina de curent, B — miezul de oţel moale al bobinei de curent, C — bobina de tensiune, D — miezul de oţel moale al bobinei de tensiune, E — discul rotitor din aluminiu, H — magnetul permanent, P — o plăcuţă magnetizată de frînare fixată pe miezul electromagnetului de tensiune, R — o lamelă de oţel prinsă pe axul sistemului mobil, care este atrasă şi reţinută pe loc de piesa P pentru a se evita mersul în gol al contorului, T este un punct marcat pe discul de aluminiu cu negru sau roşu pentru a se urmări mai uşor rotirea discului, iar U este mecanismul sumator.

Un detaliu al elementelor aflate în mişcare este reprezentat în figura 8.7. Axul G se roteşte pe o piesă specială M, amplasată în lagărul L_i. În locul vîrfului foarte ascuţit al axului se poate utiliza şi o bilă mică de oţel N. Lagărul este protejat împotriva loviturilor, care s-ar putea provoca la transportul contorului, printr-un resort lamelar O. Lagărul superior L_s este format dintr-o bucşă cu o placă de alamă F trasă pe axul G şi prevăzută cu o gaură prin care trece acul I al lagărului. Acest ac, confecţionat din oţel special, bine polisat, asigură elasticitatea de protecţie contra loviturilor. Pe axul G este fixat şurubul fără sfîrşit S, care transmite mişcarea de rotaţie a discului prin angrenajele Y, la mecanismul sumator U. Acest mecanism este montat într-un schelet din tablă de alamă, prevăzut cu orificii pentru axele V. Ultimul ax căruia i se transmite rotaţia are mai multe tobe de aluminiu Z cu cifre de la 0 la 9, care, prin rotire, corespunde ca cifre cantităţii de energie electrică activă înregistrată de contor.

Cînd prima tobă trece peste cifra *9*, o mută pe următoarea cu o cifră mai departe, aceasta la rîndul ei pe a treia şi aşa mai departe. Cifrele care arată kWh întregi sînt albe sau negre, iar zecimile de kWh sînt vopsite în roşu sau încadrate cu roşu. Cifrele întregi sînt despărţite de zecimale printr-o virgulă.

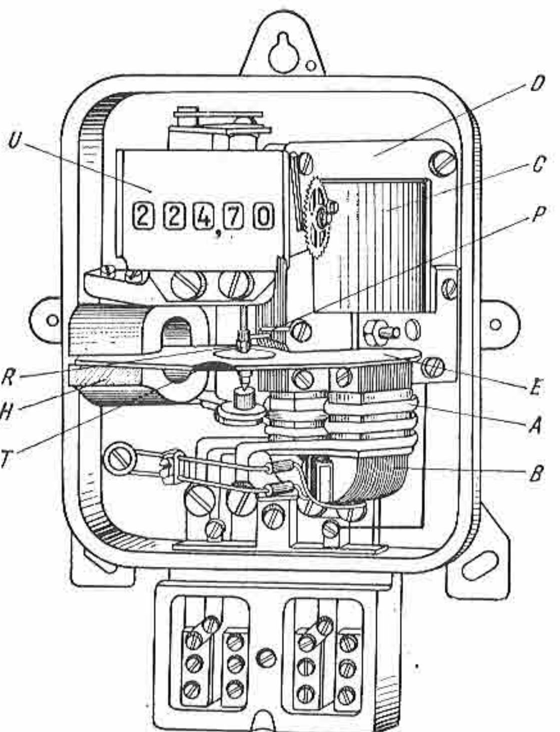


Fig. 8.6. Schema constructivă a unui contor monofazat.

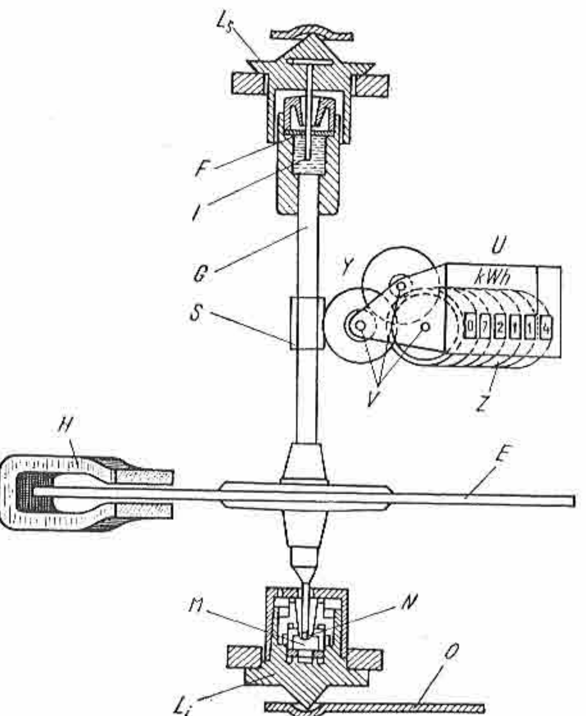


Fig. 8,7. Detalii constructive ale axului unui contor monofazat.

Magnetul de frînare H este montat pe scheletul contorului, astfel încît discul rotitor trece prin întrefierul lui.

Compensatorul de temperatură constă dintr-o rezistență, în serie cu bobina de tensiune, astfel încît efectul ei să compenseze influența variațiilor de temperatură asupra rezistivității materialului conductor al bobinei. La contoarele mai moderne se poate folosi drept compensator o lamelă bimetalică, compusă din metale cu coeficienți de dilatare diferiți. Lamela este montată la întrefierul magnetului permanent, iar deviația ei, provocată de diferența de temperatură, influențează intensitatea cîmpului magnetic, astfel încît modificarea frînării magnetului să compenseze eroarea determinată de modificarea rezistențelor metalice.

2. CONTORUL DE INDUCȚIE TRIFAZAT

Energia electrică activă în rețelele electrice trifazate se măsoară cu contoare monofazate sau trifazate. În primul caz, utilizat mai rar, se folosesc două sau trei contoare monofazate, montate după schema celor două sau trei wattmetre la măsurarea puterii active, energia totală obținîndu-se prin însumarea energiilor înregistrate de fiecare contor separat. În figura 8.8 este reprezentată o schemă cu două contoare monofazate A și B, în care bobinele de curent sînt montate în serie pe fazele R și S ale rețelei, iar bobinele de tensiune sînt montate între fazele R și T, respectiv S și T.

În figura 8.9 este reprezentată schema de montaj cu trei contoare monofazate, într-un sistem trifazat cu fir neutru.

Contoarele trifazate reunesc într-un același aparat două sau trei dispozitive de măsurare monofazate (comportînd fiecare cîte un electromagnet de curent și unul de tensiune), ale căror cupluri active acționează asupra aceluiași ax, astfel încît cuplul activ total este proporțional cu puterea activă trifazată, iar contorul măsoară energia activă totală trifazată.

În figura 8.10 este reprezentat un contor cu două echipaje de măsurare. Se observă că discurile de aluminiu ale acestora se află montate pe același ax. Un astfel de contor poate fi utilizat într-un sistem trifazat fără fir neutru.

În circuitele trifazate un conductor neutru se utilizează contoare cu trei echipaje de măsurare, montate după schema celor trei wattmetre, ca în figura 8.11. Dispozitivele de măsurare acționează asupra a trei discuri fixate pe același ax.

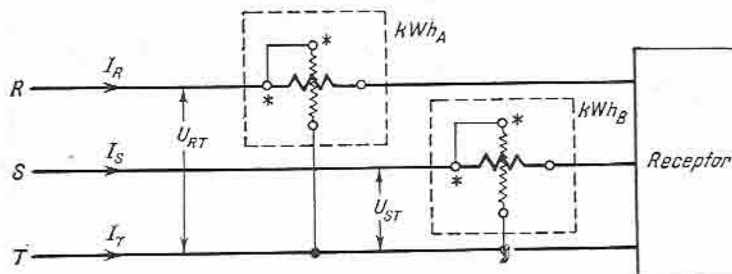


Fig. 8.8. Schemă pentru măsurarea energiei active trifazate într-un sistem nesimetric cu două contoare monofazate.

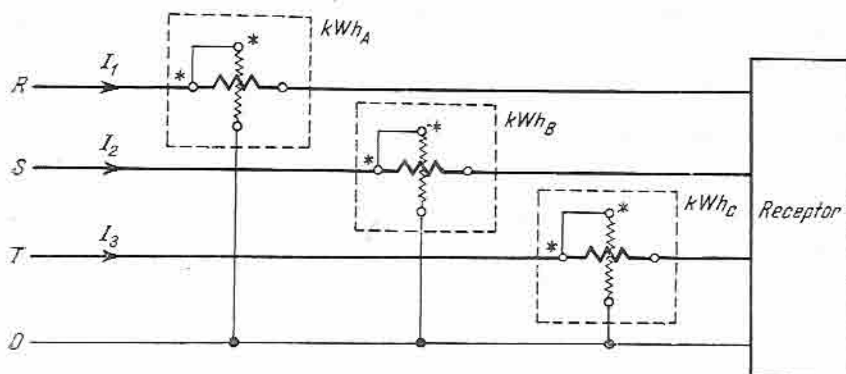


Fig. 8.9. Schemă pentru măsurarea energiei active trifazate cu trei contoare monofazate.

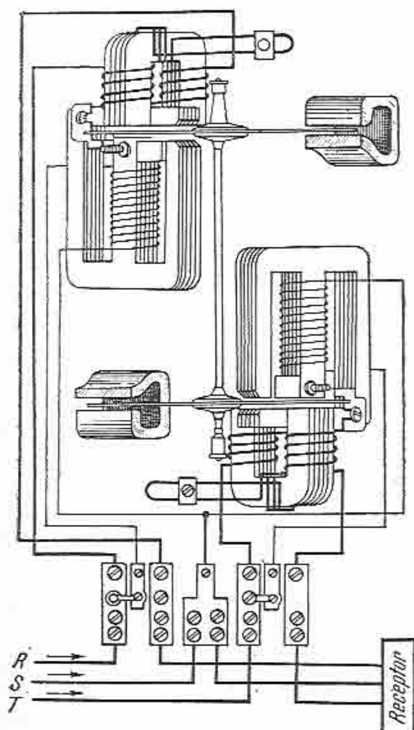


Fig. 8.10. Schema de principiu a unui contor trifazat cu două echipaje de măsurare.

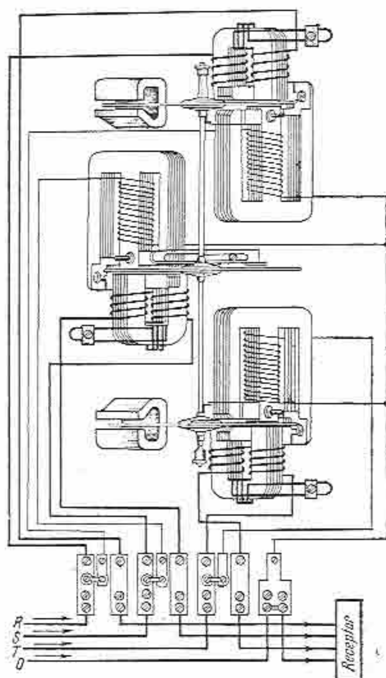


Fig. 8.11. Schema de principiu a unui contor trifazat cu trei echipaje de măsurare.

D. SCHEME DE MONTARE A CONTOARELOR

Contoarele mono- sau trifazate se pot conecta la rețea fie direct, fie prin intermediul unor transformatoare de măsurare.

În primul caz, curentul nominal al bobinelor de curent poate atinge valori pînă la 100 A, iar tensiunea bobinei de tensiune — valori pînă la 380 V. Pentru valori mai mari ale curentului și ale tensiunii, contoarele se montează prin intermediul transformatoarelor de măsură. În acest ultim caz, bobinele de curent ale contoarelor sînt dimensionate pentru un curent de 5 A, corespunzător valorii la care este redus curentul primar din rețea, iar bobinele de tensiune pentru tensiunea de 100V, la care este redusă tensiunea primară din rețea.

Contoarele legate prin intermediul transformatoarelor de măsurare pot avea fie mecanisme de înregistrare primară, fie mecanisme de înregistrare secundară. În primul caz, energia consumată este înregistrată direct corespunzător rețelei primare, iar în cel de-al doilea caz se înregistrează energia care corespunde tensiunii și circuitului secundar ale transformatoarelor de măsurare. Energia consumată în rețeaua primară se va obține prin înmulțirea înregistrării cu produsul rapoartelor de transformare de tensiune și curent, numit *constantă de citire.*

La montarea contoarelor, atît direct, cît mai ales prin intermediul transformatoarelor de măsurare, trebuie urmărită realizarea corectă a schemei, excluzîndu-se posibilitățile de conexiuni greșite, care introduc erori greu de detectat după punerea în funcțiune a instalației.

1. SCHEMA DE MONTARE A UNUI CONTOR DE ENERGIE ACTIVĂ MONOFAZAT

În figura 8.12 este reprezentată schema de montare directă în rețea a unui contor monofazat pentru înregistrarea energiei electrice active: bobina de curent A este intercalată direct în circuitul fazei R, iar bobina de tensiune C este legată în derivație, între faza R și neutrul rețelei O, fiind supusă astfel tensiunii pe fază a rețelei (de exemplu, într-o rețea de 380/220 V, contorul monofazat va măsura energia electrică activă preluată de un consumator monofazat, la tensiunea de 220 V).

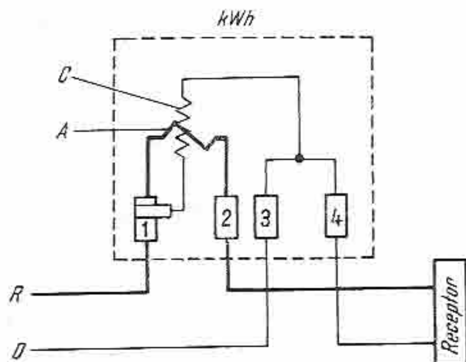


Fig. 8.12. Schemă pentru măsurarea energiei electrice active, cu un contor monofazat, într-un sistem monofazat.

În general, contoarele monofazate se construiesc pentru valori ale curenților de pînă la 40 A. Pentru valori mai mari de curent este necesar ca instalațiile electrice ale consumatorilor să fie repartizate pe trei faze ale rețelei. În acest caz, măsurarea se poate efectua fie cu două sau cu trei contoare monofazate, fie cu un contor trifazat. Dacă puterea absorbită de consumator corespunde unui curent mai mare decît 100 A pe fază, măsurarea se va face prin contoare trifazate racordate prin intermediul transformatoarelor de curent.

2. SCHEME DE MONTARE DIRECTĂ A CONTOARELOR ACTIVE ÎNTR-UN SISTEM TRIFAZAT

În sistemele trifazate, energia electrică activă măsurată este puternic influențată, din punctul de vedere al preciziei măsurării, pe de o parte de simetria încărcării pe cele trei faze, iar pe de altă parte, de factorul de putere la care este efectuată măsurarea.

Măsurarea directă a energiei electrice active într-un sistem trifazat cu încărcări simetrice, cu două contoare monofazate. În cazul în care sarcinile sînt simetrice pe cele trei faze se poate utiliza schema de montare reprezentată în figura 8.13.

Consumul de energie electrică se va determina prin adunarea celor două indicații ale contoarelor, indiferent dacă unul are indicații negative. Deci energia activă totală W_a va fi:

$$W_a = \pm W_{a1} \pm W_{a2}. \tag{8.12}$$

Relația (8.12) are următoarea explicație (fig. 8.14):

— dacă $0 < \varphi < 30°$, atunci $W_a = W_{a1} - W_{a2}$;

— dacă $30° < \varphi < 60°$, atunci $W_a = W_{a1} + W_{a2}$

— dacă $60° < \varphi < 90°$, atunci $W_a = W_{a2} - W_{a1}$.

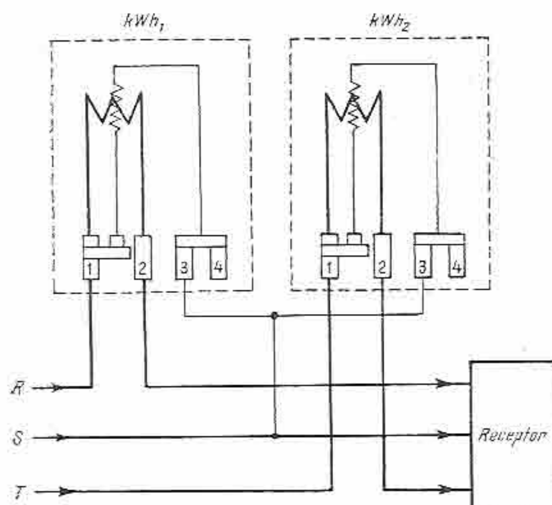


Fig. 8.13. Schemă pentru măsurarea energiei electrice active, într-un sistem trifazat, cu două contoare monofazate.

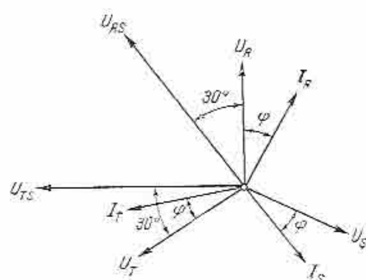


Fig. 8.14. Diagrama fazorială în cazul măsurării energiei electrice active trifazate, cu ajutorul a două contoare monofazate.

Măsurarea directă a energiei electrice active într-un sistem trifazat cu încărcări nesimetrice, cu trei contoare active monofazate. Pentru măsurarea energiei electrice active într-o rețea în care sarcinile sînt nesimetrice pe cele trei faze, se poate utiliza schema cu trei contoare monofazate de energie activă, reprezentată în figura 8.15.

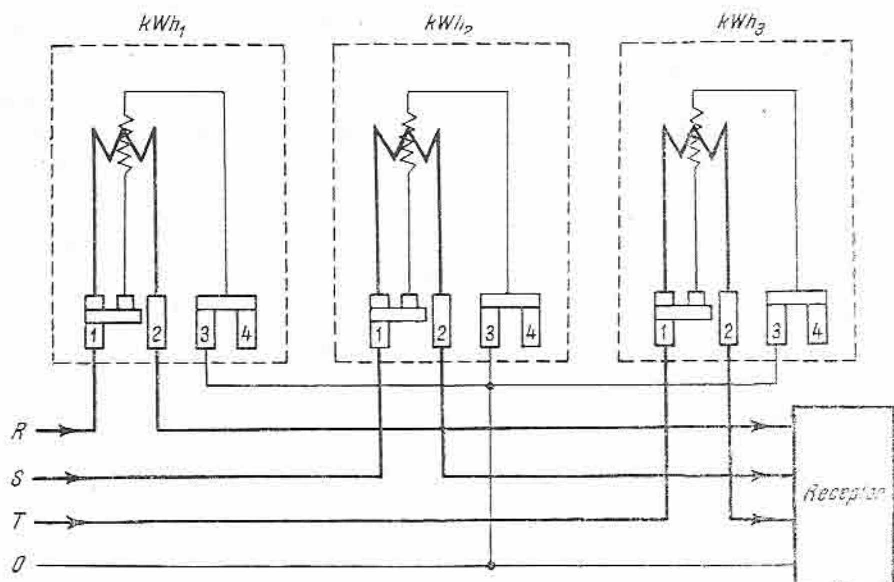


Fig. 8.15. Schemă pentru măsurarea energiei electrice active într-un sistem trifazat, cu trei contoare monofazate.

Energia electrică total consumată va fi egală cu însumarea indicațiilor celor trei contoare, deci:

$$W_a = W_{a1} + W_{a2} + W_{a3}. \tag{8.13}$$

Măsurarea directă a energiei electrice active într-un sistem trifazat, cu încărcări simetrice, cu un contor trifazat. În astfel de cazuri, determinate în special de receptoare trifazate cu sarcini echilibrate — $I_R + I_S + I_T = 0$ — (de exemplu, motoare electrice), se utilizează contoare trifazate cu două sisteme de măsurare, indicațiile date de mecanismul de înregistrare indicînd direct energia consumată (fig. 8.16).

Se observă din figură că bobinele de curent ale fazelor R și T sînt străbătute de curentul din aceste faze, iar bobinele de tensiune sînt conectate la tensiunile dintre faze, după principiul folosit la metoda celor două wattmetre.

Măsurarea directă a energiei electrice active într-un sistem trifazat cu sarcini dezechilibrate, cu un contor trifazat, cu trei sisteme de măsurare. Dacă încărcările pe cele trei faze sînt nesimetrice și dezechilibrate ($I_R + I_S + I_T \neq 0$), ceea ce se întîmplă în special cînd sarcina corespunde unor

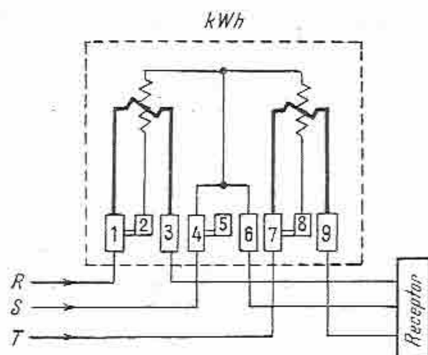


Fig. 8.16. Schemă pentru măsurarea directă a energiei electrice active într-un sistem trifazat, cu un contor trifazat cu două sisteme de măsurare.

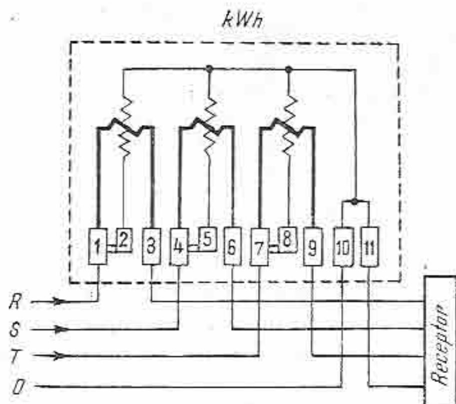


Fig. 8.17. Schemă pentru măsurarea directă a energiei electrice active într-un sistem trifazat, cu un contor trifazat cu trei sisteme de măsurare.

receptoare legate între fază şi neutru, atunci se utilizează contoare trifazate cu trei sisteme de măsurare (fig. 8.17).

Indicaţiile date de mecanismul de înregistrare al contorului vor reprezenta energia electrică activă consumată.

3. SCHEME DE MONTARE A CONTOARELOR DE ENERGIE ACTIVĂ ÎNTR-UN SISTEM TRIFAZAT PRIN INTERMEDIUL TRANSFORMATOARELOR DE CURENT ŞI DE TENSIUNE

Măsurarea energiei electrice active într-un sistem trifazat cu un contor trifazat de energie activă prin intermediul transformatoarelor de curent. Într-un sistem în care curenţii depăşesc 100 A se utilizează schema de legătură din figura 8.18, în care bobinele de curent sînt supuse unui curent redus (de obicei, raportul transformatoarelor de curent este ales astfel încît în secundarul lui curentul să fie de 5 sau 1A), iar bobinele de tensiune sînt supuse tensiunii de fază (în general, 220 V).

Mecanismul de înregistrare va reda direct, dacă este construit astfel, energia electrică consumată. În caz contrar, indicaţiile contorului vor trebui înmulţite cu raportul de transformare al reductoarelor de curent.

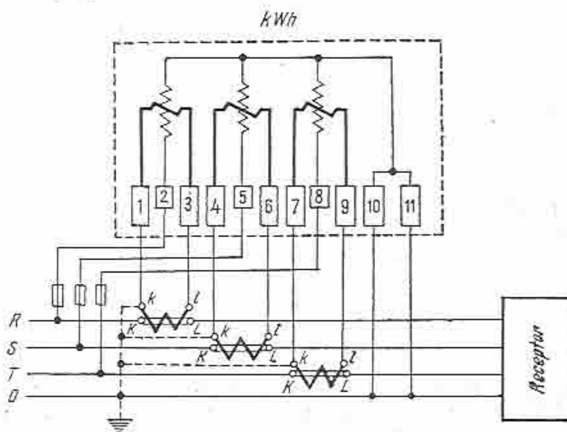


Fig. 8.18. Schemă pentru măsurarea energiei electrice active cu un contor trifazat cu trei echipaje de măsurare, prin intermediul a trei transformatoare de curent.

Același sistem se poate aplica și dacă schema de legătură se referă la contoare cu două sisteme de măsurare, în care caz se vor utiliza două transformatoare de curent montate pe două faze.

O atenție deosebită trebuie acordată:

— continuității circuitelor din secundarul transformatoarelor de curent, care în nici un caz în timpul funcționării nu trebuie să rămînă deschise (întrerupte);

— legării la pămînt a bornelor secundare ale transformatoarelor de curent, din motive de protecție a muncii.

Măsurarea energiei electrice active într-un sistem trifazat cu un contor trifazat prin intermediul transformatoarelor de curent și de tensiune. În cazul în care este necesară și utilizarea transformatoarelor de tensiune alături de cele de curent (cazul general al măsurărilor în rețelele de înaltă tensiune peste 1 kV), schemele de legătură diferă în funcție de precizia dorită a măsurării și de transformatoarele de tensiune utilizate.

În figura 8.19 se prezintă schema de legare a unui contor activ trifazat cu două echipaje de măsurare, care se utilizează în sisteme cu curenți echilibrați. Caracteristic acestui montaj este faptul că, în locul unui transformator de tensiune trifazat, se pot utiliza două transformatoare de tensiune monofazate legate în V.

Similar cazului de mai sus, se poate utiliza și un contor activ trifazat cu trei echipaje de măsurare, în locul celor două transformatoare de tensiune montate în V, fiind montat un transformator de tensiune trifazat (fig. 8.20).

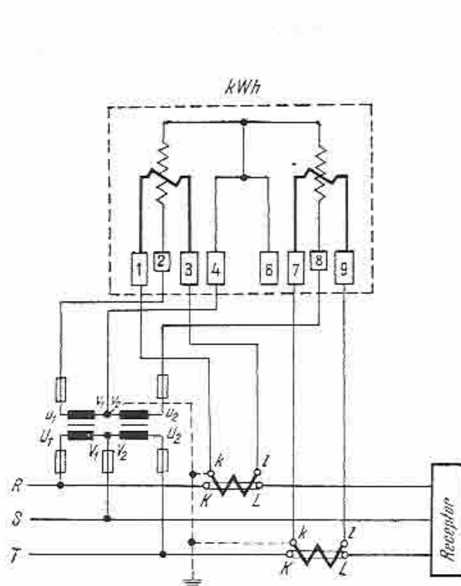


Fig. 8.19. Schemă pentru măsurarea energiei electrice active, cu contoare trifazate cu cîte două echipaje de măsurare, într-un sistem trifazat simetric, cu neutrul inaccesibil, prin intermediul a două transformatoare de curent și a unui transformator de tensiune.

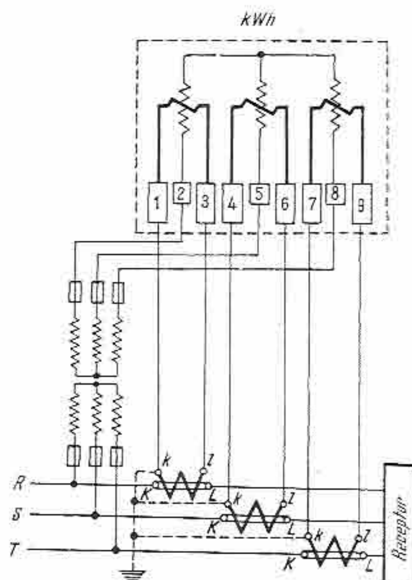


Fig. 8.20. Schemă pentru măsurarea energiei electrice active cu contoare cu trei echipaje de măsurăre prin intermediul a trei transformatoare de curent și un singur transformator de tensiune trifazat.

În ambele cazuri indicate mai sus, contoarele sînt construite, fie pentru a înregistra direct energia electrică consumată (deci mecanismul de înregistrare ține seamă de raporturile de transformare ale transformatoarelor de curent și tensiune), fie pentru 5A și 100 V, în care caz indicațiile vor trebui înmulțite cu o constantă ce rezultă din înmulțirea celor două rapoarte de transformare.

4. SCHEME DE MONTARE A CONTOARELOR ACTIVE ȘI REACTIVE ÎNTR-UN SISTEM TRIFAZAT PRIN INTERMEDIUL TRANSFORMATOARELOR DE CURENT ȘI DE TENSIUNE

În acest caz, pentru energia activă se utilizează, de exemplu, contoare de fabricație românească de tip CA, iar pentru energia electrică reactivă se utilizează contoare de fabricație românească de tip CR. Amîndouă formează un bloc de măsurare, cu posibilități multiple de legare. În cele ce urmează se indică două exemple de scheme de legătură utilizate mai des.

Măsurarea energiei electrice active și reactive într-un sistem trifazat cu fir neutru, prin intermediul transformatoarelor de curent. Se utilizează în general pentru consumatorii industriali alimentați la 380/220 V (cu fir neutru), schema de legătură fiind ca în figura 8.21.

Măsurarea energiei electrice active și reactive într-un sistem trifazat, prin intermediul transformatoarelor de curent și de tensiune. Se utilizează în general pentru măsurări în rețelele de înaltă tensiune (fără fir neutru) sau pentru consumatorii industriali alimentați în înaltă tensiune, schema de legătură fiind cea din figura 8.22.

E. CONTOARE SPECIALE

1. CONTOARE CU TARIF DUBLU

Tariful dublu se utilizează în curent mono- și trifazat, cînd prețul energiei diferă după orele din zi la care se înregistrează consumul.

Contorul are două mecanisme sumatoare: *I* și *II*, dintre care unul înregistrează între anumite ore ale zilei, iar celălalt în restul timpului (fig. 8.23).

Rotița *B* se angrenează cu roata *C* a mecanismului *I*, dacă bobina *A* este fără curent. Dacă prin această bobină trece curent, armătura *E* este atrasă de magnet și, prin intermediul pîrghiei *F*, depărtează rotița *B* de roata *C* și o cuplează cu roata *D*. Ca urmare, începe să înregistreze mecanismul *II*. Bobina *A* este comandată de un contact *G*, acționat de un ceasornic. Sistemul respectiv are un cadran rotitor *H* împărțit în 24 de ore,

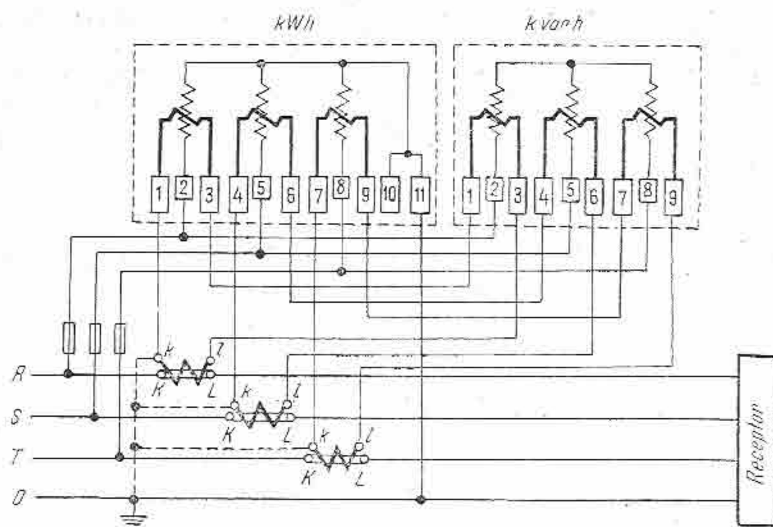


Fig. 8.21. Schemă pentru măsurarea energiei electrice active și reactive cu contoare trifazate cu cîte trei echipaje de măsurare prin intermediul transformatoarelor de curent.

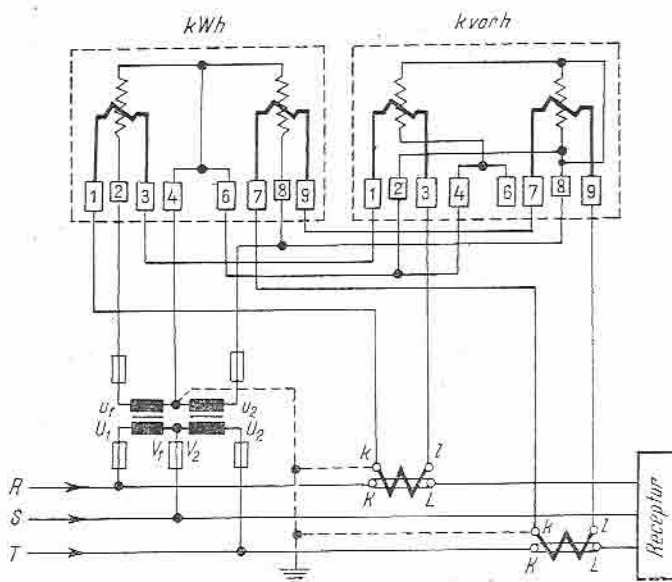


Fig. 8.22. Schemă pentru măsurarea energiei electrice active și reactive, cu contoare trifazate cu cîte două echipaje de măsurare, prin intermediul transformatoarelor de curent și de tensiune.

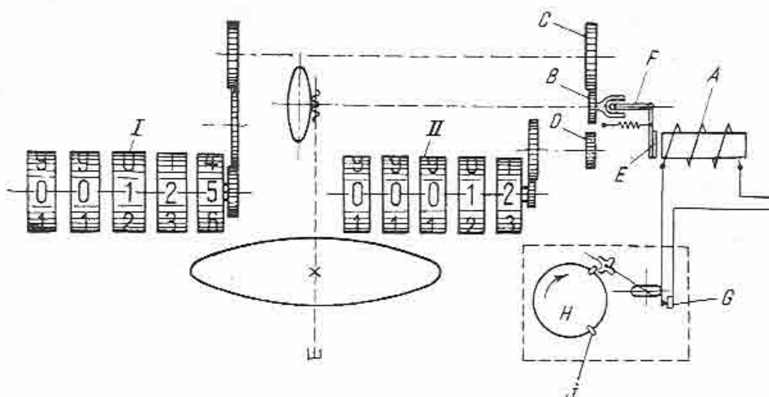


Fig. 8.23. Schema de funcționare a unui contor cu dublu tarif.

căruia i se pot aplica 2, 4 sau mai multe cuie (cavaleri) J, cu care se pot face comutări după voie. Construcțiile moderne au un ceasornic de precizie cu balansor, al cărui resort este armat automat de un mic motor electric.

2. CONTOARE CU INDICATOR DE MAXIMUM

La stabilirea prețului energiei electrice, consumate de industrii mai mari, trebuie să se ia în considerare (pe lîngă consumul total) și puterea maximă absorbită de întreprinderea respectivă. Pentru a se găsi valoarea reală a puterii maxime, trebuie luată media energiei electrice pentru un interval de timp mai îndelungat, de obicei 15 min.

Aparatul care înregistrează atît energia electrică activă absorbită pe întreaga perioadă de funcționare, cît și puterea maximă absorbită pe un interval stabilit de timp, este contorul cu indicator de maxim.

Există diferite construcții pentru realizarea acestui scop dublu, cel mai răspîndit avînd dispozitivul de indicare a puterii maxime reprezentat în figura 8.24.

Roata Z_I este în continuă mișcare, fiind acționată de axul contorului. Ea poate fi apropiată de roata Z_{II} în momentul în care electromagnetul E atrage pîrghia P, care se rotește în jurul punctului O, învingînd rezistența resortului R_1. Aceasta se întîmplă pe perioade de 15 min, timp în care se dorește să se vadă puterea maximă absorbită. O dată angrenată în mișcare, roata Z_{II}, prin intermediul știftului S,

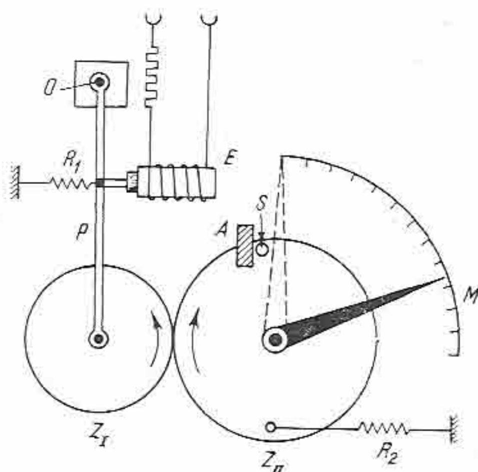


Fig. 8.24. Schema de funcționare a unui contor cu indicator de maximum.

mişcă acul indicator, care după 15 min ajunge, de exemplu, în poziţia M. În acest moment, curentul nemaitrecînd prin bobina electromagnetului, roţile Z_I şi Z_{II} se decuplează, iar roata Z_{II} este readusă de resortul R_2 în poziţia iniţială determinată de ştiftul S.

Acul a rămas însă în poziţia M, pînă la care a fost împins. La următoarea acţionare de către electromagnet, dacă puterea absorbită în cel de-al doilea interval de timp este mai mare, ştiftul S împinge mai departe acul indicator care rămîne în poziţia nou atinsă. Dacă în mişcarea sa ştiftul S nu a ajuns pînă la poziţia anterioară a acului, acesta va rămîne pe vechea poziţie.

Acul indicator se deplasează în faţa unui cadran pe care se poate citi direct puterea medie maximă în 15 min.

Odată cu citirea periodică a contorului (de exemplu, o dată la lună), acul indicator al puterii medii maxime absorbite se reduce la zero, pentru a se putea înregistra în continuare valoarea medie maximă pe 15 min, în cursul lunii următoare.

În cazul unui contor cu dublu tarif şi indicator de maxim de putere, acesta va avea două indicatoare de maximum, corespunzător celor două perioade de tarifare.

3. CONTOARE INDICATOARE DE MAXIMUM CU SISTEM DE ÎNREGISTRARE GRAFICĂ (maxigrafe)

Pentru a se cunoaşte variaţia în timp a puterii, s-au construit contoare cu indicator de maximum, cu un dispozitiv de înregistrare grafică. Un astfel de tip de aparat este maxigraful, care arată mediile încărcării raportate la intervale de timp de cîte 15 min şi, în acelaşi timp, trasează în ordonate pe o hîrtie o linie dreaptă a cărei lungime este proporţională cu puterea medie din intervalul respectiv. Banda de hîrtie deplasîndu-se continuu, liniile trasate se succed la intervale egale, care corespund la cîte 15 min şi astfel rezultă o diagramă a puterilor.

Maxigraful constă dintr-un contor normal, mono- sau trifazat, cuplat cu un dispozitiv de înregistrare grafică automată.

Banda de hîrtie este impregnată cu o substanţă astfel aleasă incît o rotiţă mică de metal, rulată pe hîrtie, să lase o urmă în linie a cărei lungime este proporţională cu puterea medie înregistrată în intervalul celor 15 min. O astfel de diagramă este reprezentată în figura 8.25.

Hîrtia înfăşurată pe un sul are la margine găuri care intră în cuiele de pe circumferinţa cilindrului de antrenare.

Viteza de deplasare a hîrtiei este de 6 mm/h, adică 1,5 mm în 15 min, rezultînd astfel o diagramă clară.

Hîrtia folosită este înfăşurată pe un al doilea sul, antrenat de mecanism prin intermediul unui cuplaj de frecare, care asigură întinderea hîrtiei. Rotiţa de metal se plimbă liber în faţa hîrtiei, fără a o atinge.

La sfîrşitul perioadei de înregistrare, în care rotiţa s-a deplasat proporţional cu energia măsurată de contorul electric, rotiţa este apăsată pe hîrtie prin intermediul unei rigle.

În acelaşi moment intră în funcţiune un mic motor electric şi readuce rotiţa apăsată pe hîrtie în poziţia zero.

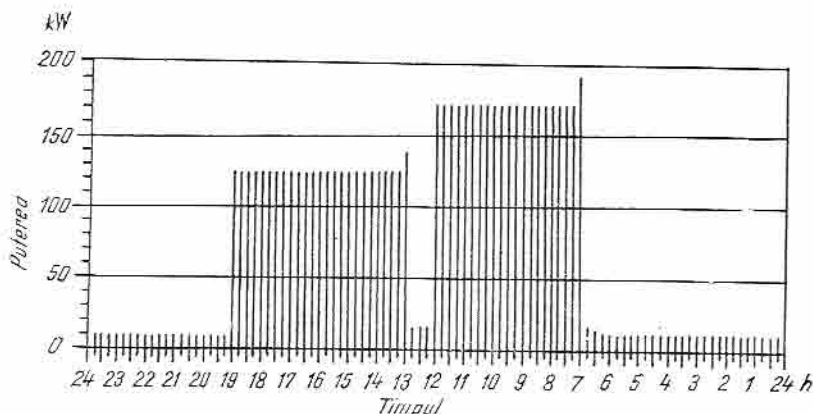


Fig. 8.25. Model de diagramă trasată de un maxigraf.

După ce rotiţa a atins poziţia zero, motorul se opreşte, rigla care a fost apăsată se eliberează, iar contorul deplasează din nou rotiţa liberă, împreună cu arătătorul de pe cadran, pînă la sfîrşitul perioadei următoare de înregistrare, cînd urmează trasarea unei noi linii.

REZUMAT

- Energia electrică activă şi reactivă se măsoară cu ajutorul contoarelor care pot fi legate direct sau prin intermediul transformatoarelor de măsurare la circuitele de curent şi tensiune.
- Energia electrică reprezentînd integrala în timp a puterii respective, contoarele corespunzătoare au practic aceleaşi scheme de conexiune şi montaj ca şi wattmetrele, respectiv varmetrele; ca urmare, principiile de folosire şi racordare a contoarelor în circuitele de sarcină sînt aceleaşi ca şi în cazul măsurării puterii (cu unul, cu două sau cu trei contoare, monofazate, respectiv cu un contor trifazat).

ÎNTREBĂRI RECAPITULATIVE

1. *Cum se clasifică contoarele electrice pe baza diverselor criterii posibile?*
2. *Se pot folosi contoare de tip electrodinamic la măsurarea energiei electrice în curent alternativ?*
3. *Se pot folosi contoare de inducţie la măsurarea energiei electrice în curent continuu?*
4. *Cum se modifică indicaţia unui contor de inducţie dacă frecvenţa reţelei variază?*

CAPITOLUL 9

MĂSURAREA FACTORULUI DE PUTERE ŞI A FRECVENŢEI

A. MĂSURAREA FACTORULUI DE PUTERE

Factorul de putere poate fi măsurat în general prin două metode de măsurare: directă şi indirectă.

1. MĂSURAREA DIRECTĂ A FACTORULUI DE PUTERE

Această metodă constă în intercalarea în circuitul electric respectiv a unui instrument de măsurare numit *cosfimetru*.

Cosfimetrele se construiesc ca logometre electrodinamice (fig. 9.1, *a*), compuse dintr-un cadru de oţel E, două bobine fixe F şi un echipaj mobil, format din bobinele mobile D_1 şi D_2.

Prin cele două bobine fixe F trece curentul de măsurat, producînd în întrefier un cîmp magnetic, în care se mişcă cele două bobine mobile D_1 şi D_2, montate pe acelaşi ax şi deplasate cu 90° una faţă de cealaltă, prin care trec curenţi proporţionali cu tensiunile din linie. Acul indicator fixat de echipajul mobil indică pe cadranul instrumentului factorul de putere (capacitiv sau inductiv).

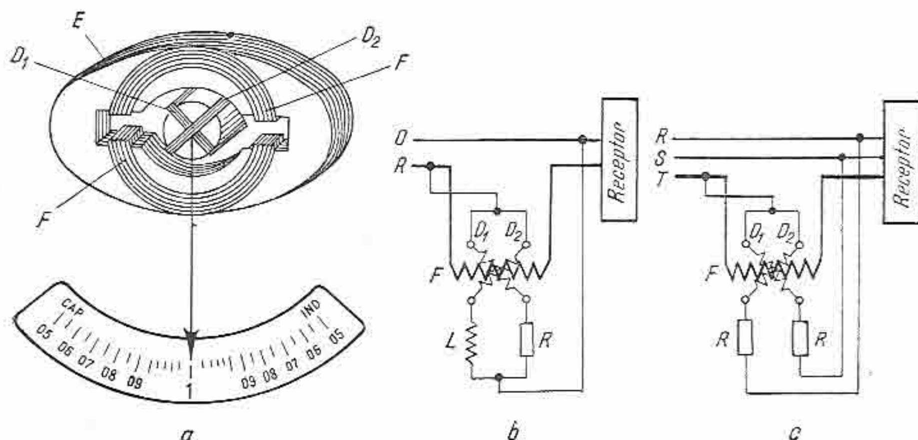


Fig. 9.1. Detalii constructive (*a*) şi scheme de montaj (*b* şi *c*) ale unui cosfimetru electrodinamic.

Principiul de funcţionare a unui cosfimetru este identic cu cel al logometrelor.

Schema de montare a cosfimetrului într-o reţea monofazată este reprezentată în figura 9.1,*b*, în care *R* reprezintă o rezistenţă ohmică, iar *L* — o inductanţă.

Schema de montare a cosfimetrului într-un sistem trifazat este reprezentat în figura 9.1, *c*. Se observă că, în acest caz, spre deosebire de primul, bobinele echipajului mobil sînt supuse tensiunii dintre două faze diferite faţă de faza al cărei curent străbate bobina fixă.

2. MĂSURAREA INDIRECTĂ A FACTORULUI DE PUTERE

Într-un circuit monofazat, măsurarea indirectă a factorului de putere se efectuează cu un wattmetru *W*, un ampermetru *A* şi un voltmetru *V*, după schema din figura 9.2.

Din relaţia:

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}, \tag{9.1}$$

se poate determina factorul de putere ($\cos \varphi$), dacă se măsoară puterea activă *P* cu wattmetrul *W*, tensiunea *U* cu voltmetrul *V* şi curentul *I* cu ampermetrul *A*.

De asemenea, într-un circuit monofazat, măsurîndu-se puterea activă *P* şi puterea reactivă *Q*, cu un wattmetru, respectiv un varmetru, factorul de putere rezultă din:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}. \tag{9.2}$$

Într-un circuit trifazat simetric, măsurarea indirectă a factorului de putere se poate efectua, fie prin metoda celor trei wattmetre, fie prin metoda celor două wattmetre.

În *metoda celor trei wattmetre* se măsoară puterea activă totală *P*, tensiunea între faze U_{RS} şi curentul I_R, factorul de putere rezultînd din relaţia:

$$\cos \varphi = \frac{P}{U_{RS} I_R}. \tag{9.3}$$

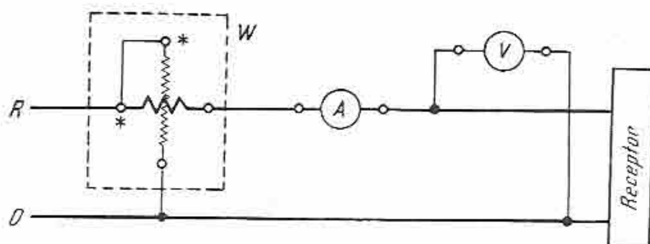


Fig. 9.2. Schemă pentru măsurarea indirectă a factorului de putere într-un circuit monofazat.

În *metoda celor două wattmetre* se măsoară puterile active P_1 și P_2 indicate de cele două instrumente, iar unghiul de defazaj rezultă indirect* din:

$$\frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} = \frac{\cos(30^\circ - \varphi) - \cos(30^\circ + \varphi)}{\cos(30^\circ - \varphi) + \cos(30^\circ + \varphi)} = \operatorname{tg}\varphi \operatorname{tg} 30^\circ,$$

și deci:

$$\operatorname{tg}\varphi = \sqrt{3}\,\frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2}. \qquad (9.4)$$

B. MĂSURAREA FRECVENȚEI

Ca și în cazul factorului de putere, pentru măsurarea frecvenței se pot utiliza două genuri de măsurări, directe și indirecte.

1. MĂSURAREA DIRECTĂ A FRECVENȚEI

Măsurarea directă a frecvenței constă în utilizarea unor aparate numite frecvențmetre. Acestea pot fi, în general, de două tipuri, primul tip bazîndu-se pe fenomenul de rezonanță mecanică, iar cel de-al doilea tip, pe fenomenul de rezonanță electrică.

Din *frecvențmetrele pe bază de rezonanță mecanică* face parte frecvențmetrul cu lamele care a fost descris în capitolul 3 (fig. 3.15).

Legarea la rețea a frecvențmetrelor pe bază de rezonanță mecanică se efectuează în derivație.

Din *frecvențmetrele pe bază de rezonanță electrică* face parte frecvențmetrul cu ac indicator sau altfel numit frecvențmetrul cu logometru electrodinamic. Schema unui astfel de frecvențmetru este reprezentată în figura 9.3. Bobina fixă S_1 este în serie cu inductanța L_1, la acestea aplicîndu-se tensiunea a cărei frecvență se măsoară. Echipajul mobil are două bobine,

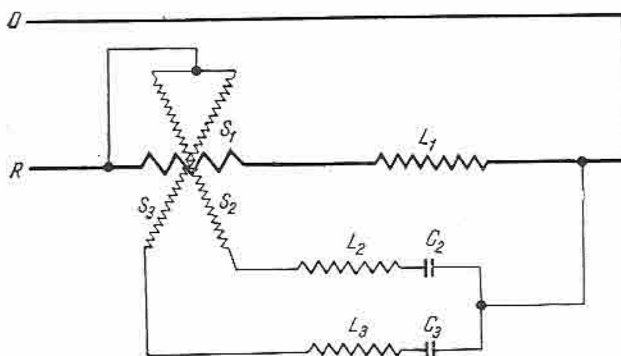


Fig. 9.3. Schema unui frecvențmetru cu logometru.

* În cazul sistemelor trifazate, în general raportul între puterea activă și cea aparentă reprezintă un factor de putere mediu, întrucît în realitate există φ_R, φ_S și φ_T.

S_2 și S_3, fiecare dintre ele fiind legată în serie cu cîte o capacitate și o inductanță.

Mărimile acestora L_2 și C_2, respectiv L_3 și C_3, sînt astfel alese încît circuitele bobinelor să fie acordate la rezonanță în modul următor:

— bobina S_2 pentru o frecvență cu 10% mai mică decît cea nominală a aparatului;

— bobina S_3 pentru o frecvență cu 10% mai mare decît cea nominală a aparatului.

Astfel, într-o rețea cu o frecvență de 50 Hz, circuitul S_2 este acordat pentru 45 Hz, iar circuitul S_3 pentru 55 Hz.

În aceste condiții, la frecvența nominală, curenții din bobinele S_2 și S_3 vor fi egali și acul indicator se va menține la mijlocul scării aparatului.

Dacă se modifică frecvența față de cea nominală, atunci într-una dintre bobine curentul va crește, iar în cealaltă va scădea, ceea ce conduce la deplasarea acului indicator, într-un sens sau altul.

2. MĂSURAREA INDIRECTĂ A FRECVENȚEI

Măsurarea indirectă a frecvenței într-un circuit de curent alternativ se poate efectua măsurîndu-se turația alternatorului care alimentează circuitul sau a unui motor sincron alimentat de circuitul respectiv.

Formula de calcul este:

$$f = \frac{pn}{60}, \qquad (9.5)$$

în care:

f este frecvența, în Hz;

p — numărul de perechi de poli ai alternatorului sau ai motorului sincron;

n — turația alternatorului sau a motorului sincron, în rot/min.

REZUMAT

- *Măsurarea factorului de putere* se poate face prin metoda:
  - — directă (cosfimetru);
  - — indirectă (wattmetre).
- *Măsurarea frecvenței* se poate face prin metoda:
  - — directă (frecvențmetru: cu lamele / cu ac indicator);
  - — indirectă (prin măsurarea turației).

ÎNTREBĂRI RECAPITULATIVE

1. *Care este principiul constructiv al cosfimetrului?*
2. *Cum se măsoară factorul de putere în sistemele trifazate, cu și fără fir neutru?*
3. *Care este principiul constructiv al frecvențmetrului cu lamele?*

MĂSURAREA MĂRIMILOR MAGNETICE

Măsurările care se efectuează asupra materialelor feromagnetice folosite la construcţia aparatelor şi a maşinilor electrice sînt de trei categorii:

— *determinarea curbei de magnetizare a materialelor feromagnetice*, adică a curbei de variaţie a inducţiei magnetice B în funcţie de cîmpul magnetic $H[B = f(H)]$, din care se determină curba permeabilităţii magnetice a materialului în funcţie de cîmpul H;

— *determinarea pierderilor în fier*, adică a curbei care arată variaţia inducţiei B în funcţie de cîmpul H, pentru o variaţie a acestuia între limitele $+H_{max}$, 0, $-H_{max}$, 0, $+H_{max}$;

— *măsurarea pierderilor magnetice corespunzătoare unei anumite inducţii şi unei anumite frecvenţe*, evaluate în W/kg şi înglobînd pierderile prin histerezis şi curenţii turbionari (Foucault).

Pentru constructorii de maşini, datele de mai sus sînt necesare, deoarece pe aceste date se bazează calculul de dimensionare a circuitelor magnetice, precum şi calculele de încălzire şi randament.

A. DETERMINAREA CURBEI DE MAGNETIZARE ŞI A CICLULUI DE HISTEREZIS

1. METODA TORULUI

În schema de montaj reprezentată în figura 10.1, torul confecţionat din materialul ce urmează a fi cercetat este prevăzut cu o înfăşurare de magnetizare, cu n_1 spire, bobinată uniform pe toată lungimea torului, şi cu o înfăşurare secundară de măsurare, cu n_2 spire, legată printr-o rezistenţă r la bornele unui galvanometru balistic GB.

Înfăşurarea de magnetizare este alimentată cu un curent I, care poate fi reglat cu reostatul R_h şi inversat cu ajutorul unui comutator special K_1.

Variaţia curentului I produce în tor o variaţie a inducţiei magnetice, ΔB, şi deci o variaţie de flux $\Delta\Phi = S\Delta B$, unde S este secţiunea torului,

în m^2. În acest caz, prin galvanometru trece o cantitate de electricitate care produce o deviație:

$$\alpha = \frac{Q}{K}, \tag{10.1}$$

în care:

Q este cantitatea de electricitate produsă în circuitul galvanometrului, în C;

K — constanta galvanometrului, în C/mm.

Cantitatea de electricitate din circuitul galvanometrului este direct proporțională cu variația inducției magnetice ΔB în tor și invers proporțională cu rezistența totală R a circuitului de măsurare al galvanometrului G, adică:

$$Q = \frac{n_2 S \Delta B}{R}. \tag{10.2}$$

Ținîndu-se seamă de relația (10.1), rezultă că:

$$\alpha = \frac{n_2 S \Delta B}{KR} \tag{10.3}$$

și

$$\Delta B = \frac{KR\alpha}{n_2 S} \ [\text{Wb/m}^2]. \tag{10.4}$$

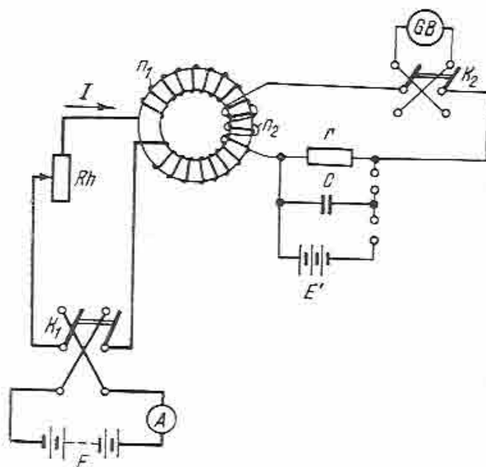


Fig. 10.1. Scheme de montaj pentru metoda torului.

Pentru ridicarea curbei de magnetizare, materialul se demagnetizează scăzîndu-se curentul de magnetizare de la o valoare maximă (mai mare decît aceea corespunzătoare cîmpului pînă la care se va ridica curba de magnetizare) pînă la valoarea zero, inversîndu-se succesiv curentul pe parcurs cu ajutorul comutatorului K_1.

Curba de magnetizare se obține variindu-se valoarea curentului de magnetizare în mod crescător.

Se alege o valoare I_n a curentului de magnetizare. Inversîndu-se curentul de la $+I_n$ la $-I_n$, galvanometrul înregistrează o deviație:

$$\alpha_n = \frac{2n_2 S B_n}{KR}, \tag{10.5}$$

de unde se deduce inducția magnetică:

$$B_n = \frac{KR\alpha_n}{2n_2 S} \ [\text{Wb/m}^2]. \tag{10.6}$$

Valoarea cîmpului magnetic H este dată de relația:

$$H_n = \frac{n_2 I_n}{l} \ [\text{Asp/m}], \tag{10.7}$$

în care l este lungimea medie a torului, în m.

Astfel se obține un punct al curbei de magnetizare de coordonate H_n și B_n.

Pentru a se obține al doilea punct al curbei se micșorează rezistența reostatului R_h și se obține o valoare mai mare a curentului de magnetizare I_p. Acestui punct îi corespunde o inducție magnetică:

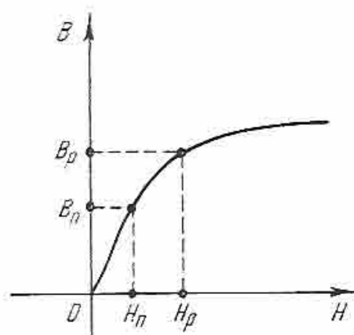


Fig. 10.2. Aspectul curbei de magnetizare.

$$B_p = \frac{KR\alpha_p}{2n_2S}.$$

Valoarea cîmpului magnetic H va fi:

$$H_p = \frac{n_1 I_p}{l}.$$

Mărindu-se apoi treptat curentul de magnetizare se obține un șir de puncte ale curbei de magnetizare, pînă la limita dorită. O astfel de curbă de magnetizare are aspectul din figura 10.2.

Constanta K a galvanometrului balistic se determină prin tarare.

Una dintre metodele de tarare utilizează un condensator etalon C, de valoare cunoscută, montat ca în figura 10.1, și o sursă auxiliară E', pentru încărcarea condensatorului. Descărcîndu-se condensatorul C pe rezistența r în galvanometrul balistic, se obține o elongație α_0, exprimată de relația:

$$\alpha_0 = \frac{CE'r}{KR} \text{ [mm]}, \tag{10.8}$$

în care:

K este constanta galvanometrului balistic, în C/mm;

C — capacitatea, în F;

E' — tensiunea sursei auxiliare, în V.

Din această relație se poate deduce constanta galvanometrului balistic, celelalte elemente fiind cunoscute. Practic, se determină însă produsul $KR = \frac{CE'r}{\alpha_0}$ folosit în relațiile de mai sus ale inducției magnetice B.

O altă metodă de tarare a galvanometrului balistic folosește un etalon de inductanță mutuală. În montajul din figura 10.3, bobina de măsurare a torului se montează în serie cu secundarul b' al inductanței mutuale M și cu galvanometrul balistic GB. Rezistența totală a acestui circuit este R. În primarul b_1 al inductanței mutuale M se variază curentul I' de la $+I'$ la $-I'$. În acest caz, în secundarul b', fluxul Φ va varia corespunzător $(2\Phi')$

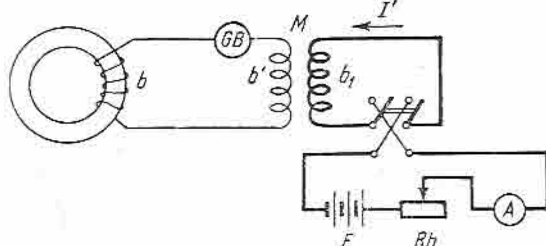


Fig. 10.3. Tararea galvanometrului balistic prin metoda inductanței mutuale.

și prin galvanometrul balistic va trece o cantitate de electricitate Q' dată de relația:

$$Q' = \frac{2\Phi'}{R} = \frac{2MI'}{R} \text{ [C]}, \qquad (10.9)$$

în care:

M este inductanța mutuală, în H;
I' — curentul în primar, în A;
R — rezistența circuitului, în Ω.

Galvanometrul balistic va înregistra elongația α_0. Întrucît $\alpha_0 = \frac{Q'}{K}$, rezultă pentru constanta K valoarea:

$$K = \frac{2MI'}{R\alpha_0} \text{ [C/mm]}.$$

Pentru trasarea ciclului de histerezis, curentul se ridică pînă la valoarea I_{max} corespunzătoare cîmpului magnetic maxim H_{max} și inducției magnetice B_{max}, pentru care se dorește să se traseze ciclul. Se variază brusc reostatul Rh (fig. 10.1), astfel încît curentul să treacă de la valoarea $+I_{max}$ la o valoare I_n mai mică, și deci cîmpul magnetic de la $+H_{max}$ la H_n. De la punctul M la M_n (fig. 10.4) se produce o variație de inducție $\Delta B_n = B_{max} - B_n$.

Această variație de inducție este măsurată de galvanometru prin deviația α_n a galvanometrului:

$$\alpha_n = \frac{n_2 S \Delta B_n}{KR},$$

din care se obține:

$$\Delta B_n = \frac{KR\alpha_n}{n_2 S}.$$

Cunoscîndu-se valoarea inducției maxime B_{max}, rezultă:

$$B_n = B_{max} - \Delta B_n = B_{max} - \frac{KR\alpha_n}{n_2 S}. \qquad (10.10)$$

Valoarea cîmpului H_n este determinată, așa cum s-a văzut anterior, prin:

$$H_n = \frac{n_2 I_n}{l}. \qquad (10.11)$$

În acest fel s-a stabilit poziția punctului M_n de pe curba de histerezis.

Se variază din nou curentul de la valoarea I_n la o valoare mai mică I_m, deci cîmpul de la H_n la H_m, măsurîndu-se o nouă deviație α a galvanometrului balistic, proporțională cu variația inducției magnetice $\Delta B_m = B_n - B_m$.

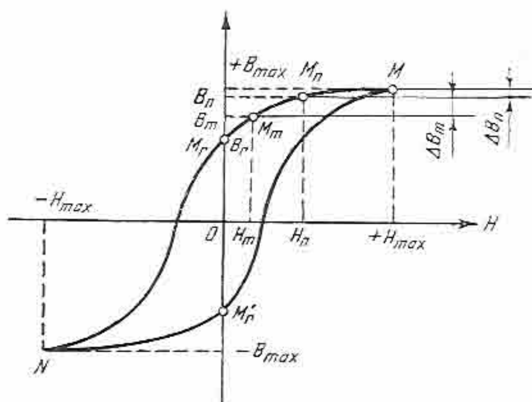


Fig. 10.4. Ciclul de histerezis. Reprezentare grafică.

În acest caz:

$$\Delta B_m = \frac{KR\alpha_m}{n_2 S},$$

iar:

$$B_m = B_n - \Delta B_m = B_n - \frac{KR\alpha_m}{n_2 S}.$$

Cunoscîndu-se și $H_m = \frac{n_1 I_m}{l}$, se poate determina al doilea punct al curbei M_m.

Experiența continuă în același mod pînă la valoarea zero a curentului de magnetizare, deducîndu-se astfel porțiunea de curbă M, M_r. Se inversează apoi sensul curentului de magnetizare, crescîndu-l deci în sens negativ, și se determină porțiunea de curbă M_r, N, dintre inducția remanentă B_r și valoarea $-B_{max}$. Ajungîndu-se în punctul N, se inversează legăturile la galvanometru cu comutatorul K_2 și se scade curentul pînă la valoarea zero, determinîndu-se astfel porțiunea de curbă N, M'_r. Se inversează din nou sensul curentului de magnetizare și treptat se crește valoarea lui pînă cînd se ajunge din nou la I_{max}, obținîndu-se astfel porțiunea de curbă M'_r, M.

2. METODA BARELOR DREPTE (permeametrelor)

Această metodă este mai simplă decît cea a torului, în sensul că materialele de studiat se confecționează sub forma unor bare ce se realizează mai ușor decît torul folosit în metoda descrisă mai sus.

Pentru a se realiza un circuit magnetic fără scăpări, în care cîmpul magnetic este uniform, circuitul magnetic al barei se închide cu chiulase (sau juguri) de secțiune mult mai mare decît bara de studiat. Scăpările de flux de la extremitățile barei sînt compensate cu ajutorul unor înfășurări de compensație.

Bara de studiat se introduce în interiorul acestor juguri, în care se găsesc înfășurările de magnetizare și de măsurare.

Modul de lucru este identic cu cel descris la metoda precedentă.

B. DETERMINAREA PIERDERILOR ÎN FIER

1. PIERDERILE PRIN HISTEREZIS

Deoarece sînt proporționale cu suprafața ciclului de histerezis, pierderile prin histerezis pot fi determinate din această suprafață, cunoscîndu-se că:

$$p_H = \frac{1}{4\pi} \oint H \, dB = \frac{1}{4\pi} S\alpha\beta \text{ [Joule/m}^3\text{]}, \tag{10.12}$$

în care α şi β sînt scările respective ale cîmpului magnetic şi inducţiei magnetice pe diagrama ciclului respectiv, adică în diagrama $B = f(H)$, pe axa absciselor $1\ m = \alpha\left[\frac{A}{m}\right]$, iar pe scara ordonatelor $1\ m = \beta\left[\frac{Wb}{m^2}\right]$.

Pierderile prin histerezis mai pot fi determinate şi prin aparate speciale, denumite histerezismetre.

2. PIERDERILE TOTALE ÎN FIER

Pierderile totale în fier se compun din *pierderile prin histerezis* şi cele *prin curenţi turbionari (Foucault)* şi se pot determina folosindu-se metoda wattmetrului cu aparatul Epstein. Determinarea se face pentru o anumită frecvenţă şi o anumită inducţie.

Aparatul Epstein se compune din patru bobine de magnetizare B_1, B_2, B_3, B_4 (fig. 10.5), aşezate după laturile unui pătrat, în care se introduc pachetele de tole de cercetat, strînse la capete cu cleme speciale, pentru a forma un circuit magnetic închis. În schema de montaj se foloseşte variacul inductiv de tensiune R_i, frecvenţmetrul F, ampermetrul A, wattmetrul W şi voltmetrul V.

Pentru eliminarea din măsurare a pierderilor în cupru ce se produc în înfăşurarea de magnetizare W_1 a celor patru bobine, aparatul este prevăzut cu încă o înfăşurare secundară W_2, prin care se alimentează circuitul de tensiune al wattmetrului şi al voltmetrului. Înfăşurarea secundară este formată tot din patru bobine dispuse sub cele patru bobine primare şi avînd în general acelaşi număr de spire.

Pentru crearea inducţiei B_{max} la care se determină pierderile este necesar să se aplice la bornele înfăşurării de magnetizare tensiunea:

$$U = 4Kfn_2B_{max}S, \tag{10.13}$$

în care:

K este factorul de formă pentru curba de curent alternativ (pentru curbe sinusoidale $K = 1,11$);

f — frecvenţa curentului alternativ, în Hz;

n_2 — numărul de spire al înfăşurării secundare;

B_{max} — inducţia maximă la care se determină pierderile, în Wb/m²;

S — secţiunea netă a pachetului de tole, în m².

Pierderile se determină, de obicei, pentru inducţii de 1 sau 1,5 Wb/m².

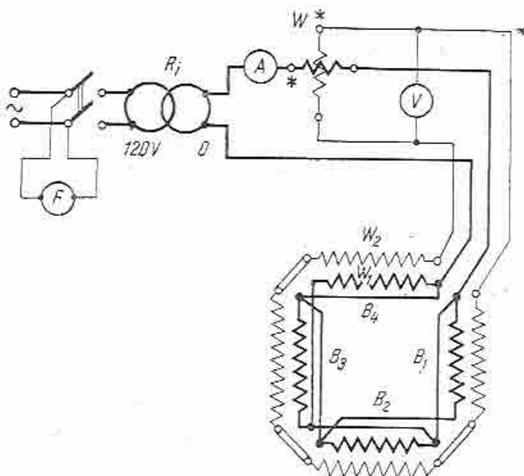


Fig. 10.5. Schema de montaj pentru determinarea pierderilor în fier cu aparatul Epstein.

Tolele au o greutate totală G (circa 10 kg), o lungime (0,5 m) și o lățime a (0,03 m), astfel că secțiunea S a pachetului de tole va fi:

$$S = \frac{G}{4l\gamma} \; [m^2],$$

în care γ este greutatea specifică a materialului (7 800 kg/m³ pentru tole obișnuite și 7 550 kg/m³ pentru tole cu siliciu supraaliat).

Pentru determinarea pierderilor se aplică circuitului de magnetizare tensiunea calculată conform relației de mai sus.

Considerîndu-se că P_m este puterea măsurată de wattmetru, pierderile în fier sînt:

$$p_{fier} = \frac{1}{10}\left(\frac{n_1}{n_2} P_m - \frac{U^2}{r_v} - \frac{U^2}{r_w}\right) \; [W/kg],$$

în care:

r_v este rezistența interioară a voltmetrului;

r_w — rezistența interioară a bobinei de tensiune a wattmetrului.

Executîndu-se două măsurări cu aparatul Epstein, la frecvențe diferite se pot separa pierderile prin histerezis de pierderile prin curenți turbionari, astfel:

— pierderile prin histerezis la frecvența f vor fi:

$$p_H = 4\,p_2 - p_1; \qquad (10.14)$$

— pierderile prin curenți turbionari la aceeași frecvență:

$$p_F = 2p_1 - 4p_2, \qquad (10.15)$$

unde:

p_1 sînt pierderile măsurate la frecvența f;

p_2 — pierderile măsurate la frecvența $\frac{f}{2}$.

REZUMAT

Măsurările mărimilor magnetice se referă în principal la:

- determinarea curbei de magnetizare $B = f(H)$, din care se poate obține variația permeabilității magnetice;
- determinarea ciclului de histerezis;
- măsurarea pierderilor magnetice (B = ct și f = ct), care cuprind pierderile prin histerezis, plus cele prin curenți Foucault (turbionari).

ÎNTREBĂRI RECAPITULATIVE

1. *Cum se determină curba de magnetizare* [$(B = f(H))$]*?*
2. *Cum se obține curba de variație a permeabilității în funcție de cîmpul magnetic* [$\mu' = f(H)$]*?*
3. *Depinde lățimea ciclului de histerezis de lățimea benzii de variație a cîmpului și de ce?*
4. *Cum se pot separa experimental pierderile prin histerezis de pierderile prin curenți Foucault?*

CAPITOLUL 11

TEHNICA MĂSURĂRII ELECTRICE A MĂRIMILOR NEELECTRICE

A. CONSIDERAȚII GENERALE

Fluxurile de materie sau de energie care contribuie la realizarea proceselor tehnologice, în general, şi deci şi a celor întîlnite în instalaţiile energetice, în special, sînt caracterizate printr-o serie de *mărimi fizice (parametri)* care pot fi împărţite în două grupe distincte:

— *mărimi electrice:* tensiune, intensitate, frecvenţă, factor de putere, rezistenţă, inductanţă, capacitate, cîmp inducţie etc.;

— *mărimi neelectrice:* presiune, debit, temperatură, turaţie, viteză, deplasare, timp etc.

Pentru măsurarea mărimilor electrice se folosesc aparatele şi metodele de măsurare prezentate în capitolele precedente, în timp ce pentru mărimile neelectrice sînt folosite aparate şi dispozitive cunoscute, ca: *manometrul* (presiune), *termometrul* (temperatură), *tahometrul* (turaţie), *cronometrul* (timp) etc.

Se observă că, pentru această ultimă grupă de mărimi, măsurarea nu poate fi practic făcută decît „la faţa locului", valoarea mărimii neelectrice măsurate neputînd fi decît citită în locul respectiv.

Rezultă deci că, *pentru a putea fi măsurată de la distanţă* (de exemplu, dintr-o cameră de comandă sau dintr-un punct de dispecer) sau pentru a putea fi introdusă într-un circuit de automatizare, *o mărime neelectrică trebuie convertită (transformată) într-o mărime electrică* (curent, tensiune, rezistenţă etc.), *proporţională cu mărimea neelectrică respectivă.* De exemplu, nivelul apei într-un lac de acumulare de la o centrală hidroelectrică poate fi măsurat de la punctul de dispecer (situat la sute de kilometri), transformînd nivelul respectiv într-un curent electric proporţional cu acesta şi care poate fi uşor *transmis la distanţă prin linii de telecomunicaţii.*

Elementul care permite convertirea („traducerea") unei mărimi fizice (de obicei, neelectrică) *într-o altă mărime fizică* (de obicei, electrică), *proporţională cu prima mărime, în scopul uşurării procesului de măsurare, se numeşte* **traductor.** Uneori, această transformare poate fi făcută direct şi simplu, de exemplu un termocuplu generează o tensiune termoelectromotoare proporţională cu o anumită temperatură (traductor de temperatură); alteori sînt necesare mai multe transformări intermediare.

De exemplu, aşa cum va rezulta din paragrafele următoare, pentru a fi măsurată, o presiune poate suferi următoarele transformări de mărimi: presiune → forţă → deplasare → unghi → reluctanţă → inductanţă → curent.

În rezumat se poate spune că un traductor cuprinde cel puțin un *element sensibil* (fig. 11.1) care transformă mărimea de măsurat X_i de intrare (de exemplu, presiune, nivel, temperatură, forță etc.) într-o mărime intermediară X_0 (de obicei, deplasare liniară sau unghiulară), care la rîndul său se transformă în mărimea de ieșire X_e (de obicei, tensiune electrică, rezistență, inductanță etc.), cu ajutorul unui *convertor de ieșire (adaptor)*.

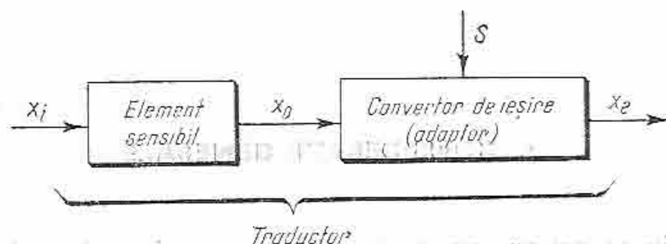


Fig. 11.1. Structura generală a unui traductor.

O astfel de structură a traductoarelor a permis „unificarea" acestora prin folosirea unor adaptoare tipizate în construirea mai multor tipuri de traductoare. Astfel, de exemplu, industria românească (IEA — Întreprinderea de elemente de automatizare) realizează un *adaptor deplasare-curent* avînd indicativul de fabricație ELT 370, care transformă o deplasare unghiulară (rotire) într-un „semnal unificat" de curent 2—10 mA. Prin folosirea unor elemente sensibile diferite pentru diverse mărimi neelectrice de măsurat se obțin o serie de *traductoare unificate* (ieșirea variază în limitele 2—10 mA, cînd mărimea neelectrică de măsurare variază între zero și valoarea maximă), care fac parte din așa-numitul *sistem unificat „E" — IEA*. Tot în cadrul aceluiași sistem unificat se mai fabrică adaptoare tensiune-curent (tip ELT160) sau rezistență-curent (tip ELT 161) și altele.

B. CARACTERISTICILE GENERALE ALE TRADUCTOARELOR

Mărimea de intrare X_i și cea de ieșire X_e a traductoarelor, deși sînt de naturi fizice diferite, sînt legate între ele printr-o relație generală de dependență:

$$X_e = f(X_i), \tag{11.1}$$

care poate fi o funcție liniară sau neliniară, cu variații continue sau discontinue (discrete).

Ținîndu-se seamă de această relație de dependență, se stabilesc următoarele *caracteristici generale* tuturor traductoarelor:

Natura fizică a mărimilor de intrare și de ieșire (temperatură, presiune, turație etc., respectiv inductanță, curent, frecvență etc.).

Puterea consumată la intrare și cea transmisă la ieșire. De obicei, puterea de intrare este relativ mică (cîțiva wați, miliwați sau chiar mai puțin *).

* De exemplu, pentru acționarea unui electrometru (galvanometru) electronic în cazul măsurării *p*H-ului este suficientă o putere de 10^{-24} W.

Caracteristica statică a traductorului care este reprezentarea grafică a relației (11.1) (fig. 11.2) și pe baza căreia se pot defini:

Sensibilitatea absolută sau *panta* K_a care este raportul dintre variația mărimii la ieșire ΔX_e și a mărimii de intrare ΔX_i (fig. 11.2):

$$K_a = \frac{\Delta X_e}{\Delta X_i}. \tag{11.2}$$

Din punct de vedere matematic, sensibilitatea absolută a traductorului reprezintă derivata curbei considerate $\left[\frac{dX_e}{dX_i}\right]$ și se mai numește și panta dinamică. Se observă că K_a variază cu X_i.

Panta medie K_m, care se obține echivalîndu-se caracteristica statică reală cu o dreaptă avînd coeficientul unghiular:

$$K_m = \text{tg}\,\alpha \approx K_a. \tag{11.3}$$

În acest caz, relația de traducere capătă forma:

$$X_e = K_m X_i + X_{e0}, \tag{11.4}$$

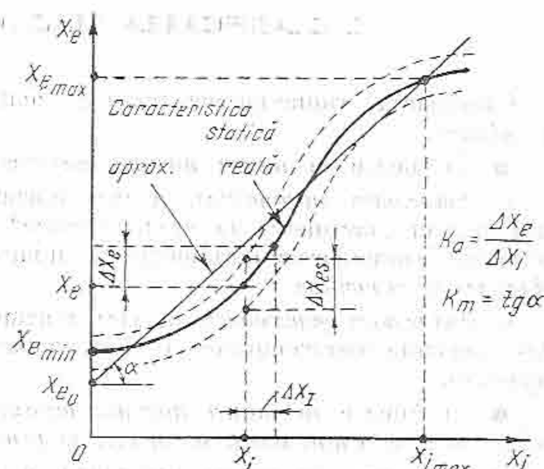


Fig. 11.2. Caracteristica statică a unui traductor.

în care X_{e0} este *valoarea de gol* a mărimii de ieșire (*ieșirea cînd intrarea* este nulă).

Sensibilitatea relativă K_r, adică raportul dintre creșterea relativă a valorii mărimii de ieșire $\left(\frac{\Delta X_e}{X_e}\right)$ și creșterea relativă a valorii mărimii de intrare $\left(\frac{\Delta X_i}{X_i}\right)$:

$$K_r = \frac{\frac{\Delta X_e}{X_e}}{\frac{\Delta X_i}{X_i}} = \frac{\Delta X_e}{\Delta X_i}\cdot\frac{X_i}{X_e} = K_a\frac{X_i}{X_e}. \tag{11.5}$$

Sensibilitatea relativă este deci un număr fără dimensiuni.

Domeniul de măsurare, definit de pragurile superioare de sensibilitate $X_{i\,max}$ și $X_{e\,max}$ și de cele inferioare $X_{i\,min}$ și $X_{e\,min}$.

Zona de insensibilitate cuprinsă între două curbe limită (desenate punctat în fig. 11.2) în jurul caracteristicii statice. Aceasta înseamnă că traducerea nu este riguros univocă, adică pentru o valoare X_i a mărimii de intrare corespunde o plajă (infinitate) de valori în intervalul ΔX_{es} ale mărimii de ieșire. Zona de insensibilitate constituie o sursă de erori și provine din cauza histerezisului magnetic sau mecanic (frecare uscată), precum și a condițiilor de funcționare (temperatură, tensiunea de alimentare, solicitări mecanice etc.).

Eroarea absolută ΔX_{ea} reprezintă diferența dintre valoarea reală a mărimii de ieșire și valoarea pentru care s-a făcut etalonarea.

Eroarea relativă ε este raportul dintre eroarea absolută şi valoarea mărimii de ieşire în punctul considerat:

$$\varepsilon\% = \frac{\Delta X_{ea}}{X_e} \cdot 100. \qquad (11.6)$$

C. CLASIFICAREA TRADUCTOARELOR

Clasificarea traductoarelor poate fi făcută pe baza mai multor criterii de definire:

● În funcţie de *natura mărimii electrice de la ieşirea* (X_e) se deosebesc:

— *traductoare parametrice*, la care mărimea de măsurat este transformată într-un „parametru de circuit electric" (rezistenţă, inductanţă sau capacitate). Traductoarele parametrice se împart deci la rîndul lor în: *rezistive*, *inductive*, şi *capacitive*;

— *traductoare generatoare*, la care mărimea măsurată este transformată într-o tensiune electromotoare a cărei valoare depinde de valoarea mărimii respective.

● În funcţie de *natura mărimii neelectrice de intrare* (X_i) se disting traductoare: *de temperatură*, *de turaţie*, *de debit*, *de nivel*, *de presiune* etc.

● Din punct de vedere *constructiv* se deosebesc:

— *traductoare neunificate*, la care mărimea de ieşire variază între valori nestandardizate;

— *traductoare unificate*, la care mărimea de ieşire variază într-un domeniu stabilit. De exemplu $i_e = 2...10$ mA.

D. ADAPTOARE FOLOSITE ÎN STRUCTURA TRADUCTOARELOR DE MĂSURARE A MĂRIMILOR NEELECTRICE

1. INTRODUCERE

După cum s-a mai arătat, sistemele de măsurare a mărimilor neelectrice folosesc în majoritatea cazurilor unele elemente tipizate, numite convertoare de ieşire sau adaptoare, care transformă mărimile intermediare obţinute de la diverse elemente sensibile în mărimi de valori unificate. După cum se va vedea mai departe, aceste adaptoare sînt folosite în alcătuirea diverselor tipuri de traductoare de mărimi neelectrice.

O largă răspîndire în sistemele de măsurare a mărimilor neelectrice o au următoarele tipuri de adaptoare fabricate de industria românească (IEA):

— adaptorul deplasare-curent;

— adaptorul tensiune (rezistenţă)-curent.

2. ADAPTORUL DEPLASARE-CURENT

Acest tip de adaptor este folosit în sistemul unificat „E" (IEA — Întreprinderea de elemente de automatizare), avînd indicativul de fabricație ELT 370 și fiind utilizat în construcția traductoarelor de presiune, debit, nivel etc.

Elementul principal în construcția acestui tip de adaptor este un *modulator magnetic cu element mobil de polarizare* (fig. 11.3), care asigură convertirea unei deplasări mecanice (rotiri) într-un semnal alternativ a cărui amplitudine este proporțională cu deplasarea unghiulară respectivă. Modulatorul cuprinde un miez magnetic toroidal M pe care sînt bobinate uniform două înfășurări identice B_x și B_y a cîte 1 200 de spire fiecare. Bobinele respective sînt dispuse pe cîte o jumătate de tor și conectate ca în figura 11.3, *a*, fiind alimentate prin transformatorul T de la o sursă de tensiune U cu frecvența $f = 500$ Hz.

Se observă că întregul ansamblu constituie o punte Wheatstone ale cărei brațe sînt bobinate B_x și B_y, precum și înfășurările transformatorului T cu tensiunile de alimentare e_x și e_y în diagonala punții fiind rezistența de sarcină R.

În centrul torului se află un rotor realizat din magnetul permanent P, a cărui rotire trebuie să fie convertită în semnal electric și a cărui axă $X—Y$ face la un moment dat unghiul α față de axa inițială $O—O'$ (perpendiculară pe axa ce separă cele două bobine). Magnetul permanent produce fluxul continuu $2\Phi_c$ care se ramifică prin tor sub forma fluxurilor Φ_c.

La aplicarea tensiunii alternative de alimentare ($U \sim$, $f = 500$ Hz), tensiunile e_x și e_y din secundarul transformatorului T, egale ca modul și opuse ca fază, vor produce curenții i_x și i_y care străbat cele două bobine B_x, respectiv B_y.

Se presupune, arbitrar, că semiperioada pozitivă a tensiunii alternative este cea indicată în figura 11.3, *a*, deci curenții i_x și i_y corespunzători celor două bobine vor avea polaritățile din figura respectivă. Tensiunile magnetomotoare produse de cei doi curenți se vor însuma ($n_x i_x + n_y i_y$; $n_x = n_y = 1\,200$ de spire), dînd naștere fluxului magnetic alternativ Φ_a ce străbate întregul tor.

Pentru un anumit unghi de rotire α al magnetului permanent P, miezul magnetic aferent bobinei B_x va fi în semiperioada pozitivă a tensiunii alternative mai saturat decît cel al bobinei B_y, deoarece:

— *pentru bobina* B_x, fluxurile Φ_c și Φ_a se însumează ($\Phi_c + \Phi_a$) pe o porțiune mai mare ($90° + \alpha$) și se scad ($\Phi_c - \Phi_a$) pe o porțiune mai mică ($90° - \alpha$);

— *pentru bobina* B_y, fluxurile Φ_c și Φ_a se scad ($\Phi_c - \Phi_a$) pe o porțiune mai mare ($90° + \alpha$) și se însumează ($\Phi_c + \Phi_a$) pe o porțiune mai mică ($90° - \alpha$).

Datorită saturației magnetice mai puternice * a bobinei B_x față de bobina B_y pentru polaritatea tensiunii indicate în figură, inductanța L_1 a bobinei B_x va fi mai mică decît inductanța L_2 a bobinei B_y. (Toate celelalte elemente ale bobinelor fiind identice, inductanțele vor fi proporționale cu permeabilitatea magnetică μ).

---

* Se reamintește că, cu cît un material magnetic este mai saturat, cu atît permeabilitatea sa magnetică μ va fi mai mică.

În consecință, deoarece $L_1 < L_2$, rezultă din schema echivalentă din figura 11.3, *b* că:

$$i_x > i_y \Rightarrow i_p = i_x - i_y > 0, \tag{11.7}$$

deci curentul i_p (pulsatoriu) care străbate rezistența R are polaritatea curentului i_x.

În *semiperioada negativă* (polarizare inversă decît în fig. 11.3, *a*), cele două bobine B_x și B_y își inversează rolul între ele și, conform celor arătate mai sus, înseamnă că $L_1 > L_2$, astfel că, corespunzător schemei echivalente din figura 11.3, *c*, rezultă:

$$i_x < i_y \Rightarrow i_p = i_y - i_x > 0, \tag{11.8}$$

adică curentul i_p are polaritatea curentului i_y, deci același sens ca și în situația precedentă și, din considerente de simetrie, și aceeași amplitudine.

În concluzie, curentul i_p cules pe rezistența R este un curent pulsatoriu de frecvență dublă (1 000 Hz) decît cea a sursei de tensiune și este proporțional cu deviația unghiulară α.

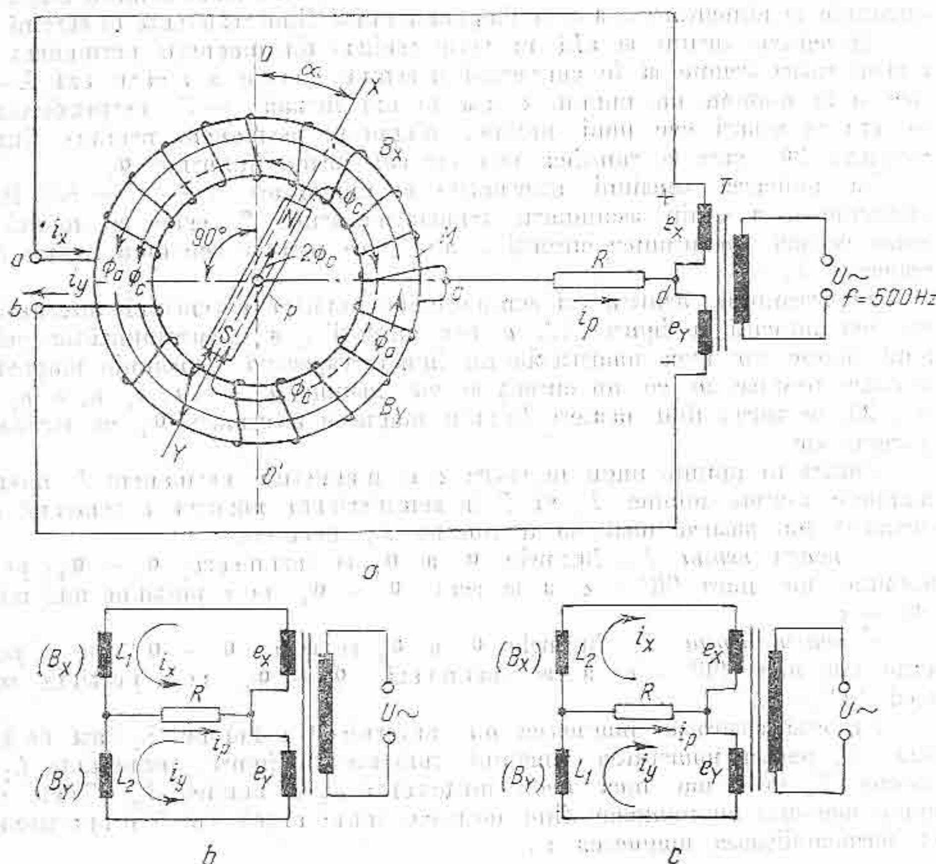


Fig. 11.3. Modulator magnetic cu element mobil de polarizare:
a — schema electrică de principiu; *b* — schema electrică echivalentă în semiperioada pozitivă; *c* — schema electrică echivalentă în semiperioada negativă.

Observație. În poziția inițială ($\alpha = 0$), magnetizarea celor două miezuri este identică în ambele alternanțe, deci $L_1 = L_2 \Rightarrow i_x = i_y = i_p = 0$.

Practic, modulatorul magnetic funcționează într-un unghi relativ mic ($\alpha_{max} \approx 16°$), convertind așadar o deplasare unghiulară într-un curent pulsatoriu, i_p.

Schema de principiu completă a adaptorului deplasare unghiulară-curent este prezentată în figura 11.4

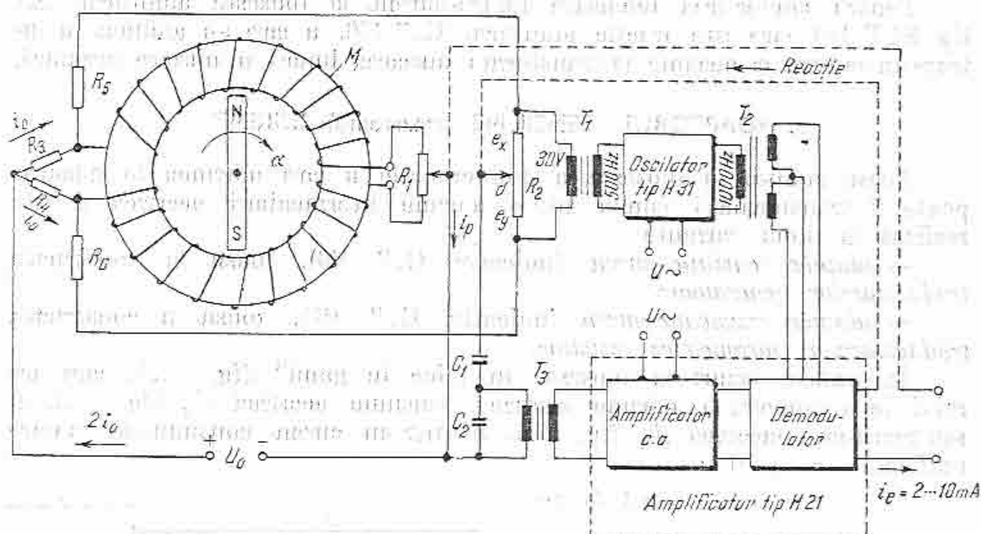


Fig. 11.4. Adaptor deplasare-curent tip ELT 370.

Modul de conectare a modulatorului magnetic M diferă puțin de schema principială din figura 11.3, *a*, și anume:

— punctul de conectare *c* a celor două bobine este realizat prin potențiometrul R_1 în scopul echilibrării sistemului, astfel încît în poziția inițială a rotorului modulatorului ($\alpha = 0$) la ieșirea adaptorului, curentul să fie de 2 mA (zero relativ);

— prin intermediul rezistențelor R_3 și R_4 li se asigură bobinelor un curent de „prepolarizare" (i_0) obținut de la sursa de curent continuu U_0 în scopul de a se evita ca în miezul toroidal cîmpul magnetic să fie egal cu zero. Acest cîmp este necesar, deoarece, în jurul originei, curba de magnetizare [$B = f(H)$] nu este liniară și prezintă o permeabilitate magnetică redusă;

— potențiometrul R_2 asigură o egalizare precisă a tensiunilor de alimentare de 500 Hz ($e_x = e_y$).

Curentul i_p de la ieșirea modulatorului magnetic alimentează printr-un filtru format din capacitățile C_1 și C_2 și printr-un transformator de adaptare T_3 un *amplificator* (IEA tip H 21) la a cărui ieșire se obține semnalul unificat $i_e = 2...10$ mA corespunzător domeniului maxim de variație al unghiului α, respectiv al domeniului de variație al mărimii neelectrice de măsurat.

Amplificatorul tip H 21 cuprinde un *amplificator de curent alternativ* tranzistorizat și *un demodulator* care transformă tensiunea alternativă amplificată în curentul unificat 2 – 10 mA.

Un *oscilator*, de asemenea tipizat (IEA tip H 31), produce tensiunea de 500 Hz care, prin transformatorul de izolare T_1, alimentează modulatorul magnetic, precum şi tensiunea de 1 000 Hz care, prin transformatorul T_2, asigură procesul de demodulare (redresare) din amplificatorul H 21.

Curentul i_e este adus printr-un circuit „de reacţie" înapoi la ieşirea modulatorului, fapt care asigură o funcţionare stabilă a adaptorului şi ansamblul său.

Impedanţa de ieşire a adaptorului ELT 370 este de 3 kΩ.

Pentru convertirea deplasare liniară-curent se foloseşte adaptorul IEA tip ELT 310 care este practic adaptorul ELT 370, la care s-a adăugat la intrare un convertor mecanic ce transformă mişcarea liniară în mişcare circulară.

3. ADAPTORUL TENSIUNE (rezistenţă)-CURENT

Acest adaptor se foloseşte la traductoarele la care mărimea de măsurat poate fi transformată comod într-o mărime intermediară electrică şi este realizat în două variante:

— *adaptor tensiune-curent* (indicativ ELT 160), folosit în construcţia *traductoarelor generatoare*;

— *adaptor rezistenţă-curent* (indicativ ELT 161), folosit în construcţia *traductoarelor parametrice rezistive.*

În ambele cazuri se foloseşte un „bloc de gamă" (fig. 11.5), care are rolul de a converti o mărime electrică [tensiune electrică U_G (fig. 11.5, *a*) sau rezistenţă electrică R_R (fig. 11.5, *b*)] într-un curent continuu de valoare unificată $i = \pm 10$ μA.

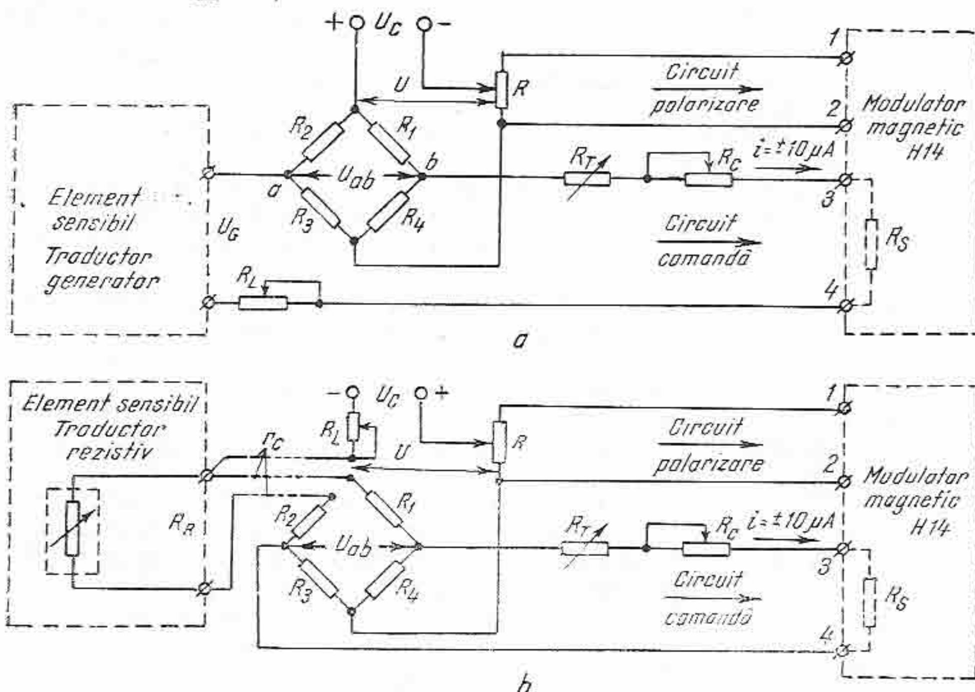


Fig. 11.5. Blocuri de gamă:

a — pentru convertirea tensiunii; *b* — pentru convertirea rezistenţei.

Adaptorul tensiune-curent (ELT 160). Blocul de gamă este alimentat de elementul sensibil al unui *traductor generator* care a convertit mărimea neelectrică măsurată într-o tensiune variabilă U_G (fig. 11.5, *a*). Tensiunea U_{ab} de dezechilibru a punții depinde de tensiunea U, respectiv de tensiunea stabilizată U_c, precum și de valorile rezistențelor R_1, R_2, R_3 și R_4 după relația:

$$U_{ab} = U \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3)}. \tag{11.9}$$

Ținîndu-se seamă de faptul că tensiunile U_{ab} și U_G sînt înseriate, rezultă expresia curentului de ieșire:

$$i = \frac{U_G + U_{ab}}{R_T + R_C + R_S + R_L}, \tag{11.10}$$

în care:

R_T este rezistența unei termorezistențe semiconductoare (termistor) care compensează erorile de măsurare datorate variațiilor de temperatură ale mediului ambiant;

R_S — rezistența de sarcină (rezistența de intrare a modulatorului magnetic *);

R_C și R_L sînt rezistențele de compensare a sarcinii (ieșire), respectiv a liniei (intrare).

Prin alegerea convenabilă a valorilor rezistențelor R_1, R_2, R_3 și R_4 se poate obține la ieșire același semnal standard $i = \pm 10$ μA pentru diverse valori ale tensiunii U_G obținute de la elementul sensibil al traductorului generator.

Adaptorul rezistență-curent (ELT 161). Blocul de gamă cuprinde într-un braț al punții Wheatstone rezistența R_R (fig. 11.5, *b*) de ieșire a elementului sensibil aferent unui *traductor parametric rezistiv* care a convertit mărimea neelectrică în rezistența variabilei R_R.

Din figura 11.5, *b* se observă că, similar cu cazul precedent, tensiunea de dezechilibru U_{ab} este dată de relația:

$$U_{ab} = \frac{(R_1 + r_c) R_3 - (R_2 + r_c + R_R) R_4}{(R_2 + r_c + R_R + R_3)(R_1 + r_c + R_4)} U, \tag{11.11}$$

iar valoarea curentului de ieșire de relația:

$$i = \frac{U_{ab}}{R_T + R_C + R_S}, \tag{11.12}$$

în care r este rezistența cablului de legătură, celelalte mărimi avînd semnificațiile din cazul precedent.

Prin alegerea convenabilă a parametrilor blocului de gamă se poate obține la ieșire același semnal standard $i = \pm 10$ μA pentru întregul domeniu de variație al rezistenței R_R, respectiv al mărimii neelectrice de măsurat.

---

* Acesta este un alt modulator magnetic tranzistorizat (tip H14), diferit de cel descris anterior și care amplifică curentul continuu *i*.

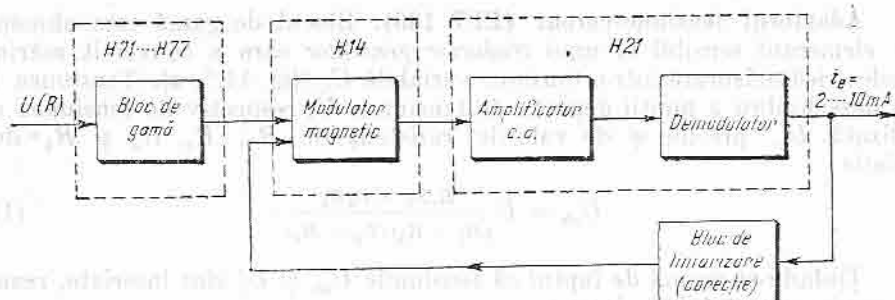


Fig. 11.6. Adaptor tensiune (rezistență) – curent tip ELT 160 (161).

Convertoarele de tensiune (rezistență)-curent cuprind un sistem electronic de amplificare a curentului continuu de la $i = \pm 10$ µA la semnalul unificat $i_e = 2...10$ mA.

Schema-bloc a adaptorului tensiune (rezistență)-curent tip ELT 160 (161) este reprezentată în figura 11.6.

E. APARATE ELECTRONICE DE MĂSURARE FOLOSITE ÎN SISTEMUL „E" (IEA)

1. INTRODUCERE

În țara noastră se construiește o gamă largă de aparate electronice indicatoare și inregistratoare cu funcții multiple aparținind sistemului „E" (neunificat sau unificat).

Toate aparatele *indicatoare* cu ac precum și cele *înregistratoare* * (și indicatoare) din sistemul „E" funcționează practic pe baza aceluiași principiu, și anume acela al compensatoarelor automate.

Deoarece toate traductoarele, parametrice sau generatoare, conțin adaptoare care asigură la ieșire un semnal (unificat) de curent (de exemplu, 2–10 mA), rezultă că sistemul „E" folosește în exclusivitate compensatoare automate.

2. APARATE ÎNREGISTRATOARE DE TIP E

Schema de principiu a înregistratoarelor de tip E este reprezentată în figura 11.7.

Mărimea de intrare — de exemplu, semnalul unificat de curent 2–10 mA — este aplicată pe rezistența R_0(R_0 = 200 Ω), producind un semnal unificat de tensiune U_i (0,4–2 V).

Potențiometrul R, alimentat de un curent constant (i = 5 mA) de la un stabilizator de curent (tip H 51), asigură o tensiune de compensare U_R opusă tensiunii U_i, astfel incit în funcționare va rezulta o tensiune de abatere (eroare) ΔU dată de diferența celor două tensiuni:

$$\Delta U = U_i - U_R. \tag{11.13}$$

---

* Toate aparatele înregistratoare sînt și indicatoare, avînd o scară gradată liniar, acul indicator fiind solidar cu cursorul potențiometrului de compensare.

În *regim staționar*, abaterea este nulă ($\Delta U = 0$), motorul MR este oprit iar potențiometrul R se află într-o poziție care asigură „compensarea":

$$U_i = U_R. \qquad (11.14)$$

Acul indicator afișează pe o scară gradată (0,4–2 V) valoarea mărimii de intrare U_i, iar penița (solidară cu cursorul și cu acul indicator)

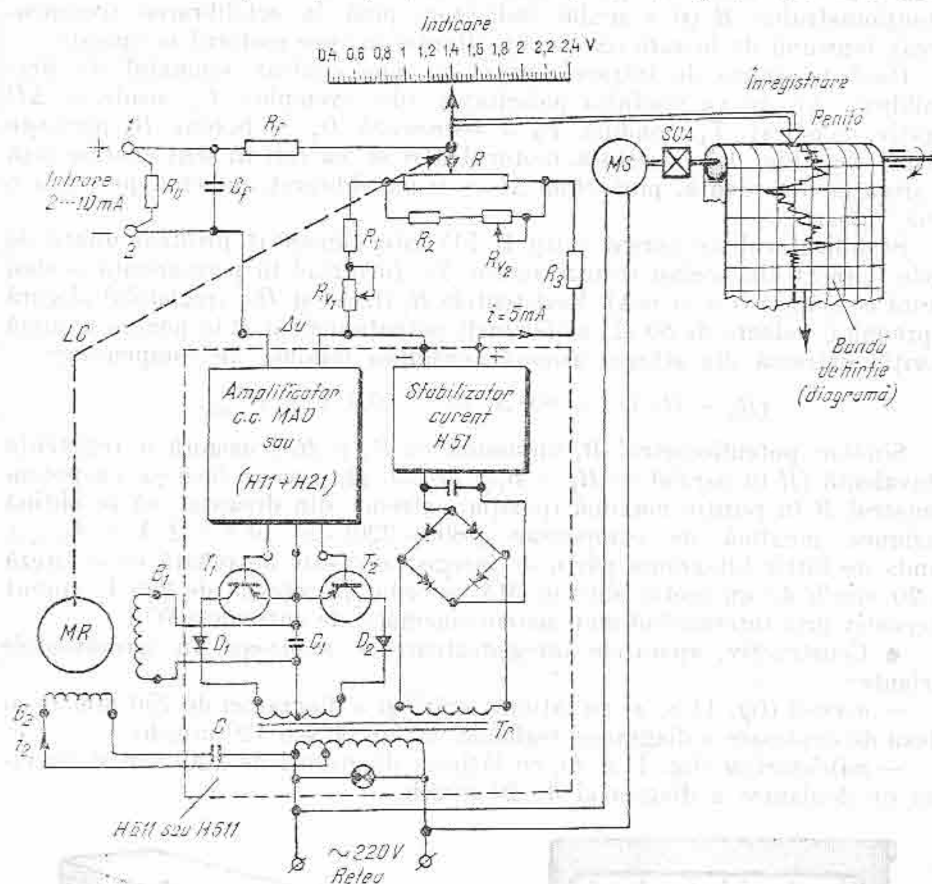


Fig. 11.7. Schema de principiu a înregistratoarelor (indicatoare) din sistemul „E" (IEA)

stă pe loc, trasînd (înregistrînd) pe diagrama de hîrtie care se deplasează cu viteză constantă aceeași valoare a tensiunii U_i.

Cînd mărimea de intrare variază într-un anumit sens (de exemplu crește), conform relației (11.13) abaterea capătă o anumită polaritate (de exemplu, pozitivă). Amplificatorul de curent continuu cu modulare-amplificare-demodulare (MAD) va furniza la ieșire o mărime amplificată, însă de aceeași polaritate. Se constată că, pentru fiecare polaritate, va conduce numai un singur tranzistor, și anume cel cu joncțiunea emitor bază polarizată direct (de exemplu, T_1), celălalt (T_2) fiind blocat.

În această situație va funcționa o singură diodă (de exemplu, D_1), asigurînd pe bobina B_1 de excitare a motorului MR un curent pulsatoriu format

numai din alternanțele de o anumită polaritate (de exemplu, pulsurile pozitive), obținute de la rețeaua de 220 V prin transformatorul de alimentare T_r.

Întrucît bobina de excitație B_2 primește permanent același curent i_2 *, motorul bifazat MR se va roti într-un anumit sens (de exemplu, pozitiv). Motorul antrenează prin legătura cinematică LC deplasarea cursorului potențiometrului R (și a acului indicator) pînă la echilibrarea (compensarea) tensiunii de intrare ($\Delta U = 0$), situație în care motorul se oprește.

Dacă tensiunea de intrare variază în sens contrar semnalul de dezechilibru, ΔU își va modifica polaritatea (de exemplu: U_i scade, $\Rightarrow \Delta U$ negativ, $\Rightarrow$ blocat T_1, conduce T_2, $\Rightarrow$ redresează D_2, $\Rightarrow$ bobina B_1 primește pulsuri negative). În consecință, motorul MR se va roti în sens contrar față de situația precedentă, pînă cînd $\Delta U = 0$ (echilibrare), indicînd pe scară o nouă valoare U_i.

Stabilizatorul de curent (tip H 51) este alimentat printr-o punte de diode (Graez) din același transformator Tr, furnizînd în permanență același curent consumat ($i = 5$ mA). Rezistențele R_1 (fixă) și R_{V_1} (reglabilă) asigură împreună o valoare de 80 Ω, astfel încît potențiometrul R în poziție minimă (poziția extremă din stînga) asigură tensiunea minimă de compensare:

$$(R_1 + R_{V_1}) \cdot i = 80 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 0,4 \text{ V} = U_{i_{min}}.$$

Similar, potențiometrul R, împreună cu R_2 și R_{V_2}, asigură o rezistență echivalentă (R în paralel cu $R_2 + R_{V2}$) de 320 Ω, ceea ce face ca, cu potențiometrul R în poziție maximă (poziția extremă din dreapta), să se obțină tensiunea maximă de compensare $[(80 + 320) \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 2 \ V = U_{i_{max}}]$. Banda de hîrtie (diagrama părții de înregistrare) este antrenată cu o viteză de 20 mm/h de un motor sincron MS racordat la rețeaua de 220 V curent alternativ prin intermediul unui sistem cinematic de antrenare SCA.

● Constructiv, aparatele înregistratoare se realizează în următoarele variante:

— *normal* (fig. 11.8, *a*) cu lățimea scării și a diagramei de 250 mm și cu viteza de deplasare a diagramei reglabilă la 20, 60 sau 120 mm/h;

— *miniaturizat* (fig. 11.8, *b*), cu lățimea diagramei de 120 mm și cu viteza de deplasare a diagramei de 20 mm/h.

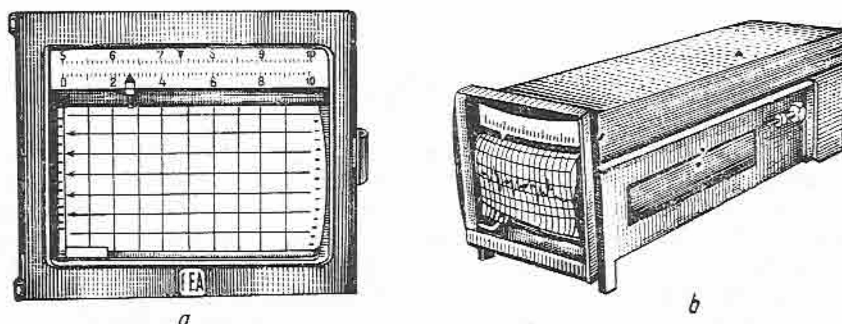


Fig. 11.8. Aparat electronic înregistrator:
a — format normal; *b* — format miniatură.

---

* Curentul i_2 este decalat cu 90° cu ajutorul capacității C, pentru ca motorul MR să poată primi un cîmp magnetic bifazat (învîrtitor).

Variantele de execuţie sînt:

pentru semnale neunificate (seria E):

— tip E 35 — înregistrator miniatură cu o singură peniţă;

— tip E 36 — înregistrator normal cu o singură peniţă;

— tip E 45 — înregistrator miniatură cu două peniţe;

— tip E 46 — înregistrator normal cu două peniţe;

pentru semnale unificate (seria ERL):

— tipurile ELR 35, ELR 36, ELR 45 şi ELR 46, care au aceleaşi caracteristici ca tipurile omoloage pentru semnale neunificate.

3. APARATE INDICATOARE DE TIP E

Aparatele indicatoare folosesc ca şi cele indicatoare aceleaşi tipuri de compensatoare automate (fig. 11.7), cu deosebirea că potenţiometrul de compensare, ca şi scara gradată sînt circulare avînd un unghi de 270° (fig. 11.9).

Gabaritul frontal este de 158×158 mm, iar lungimea desfăşurată a scării este de 235 mm. Scările de măsurare sînt standardizate, fiind liniare sau pătratice, pe scară avînd imprimat şi un factor de scară, precum şi simbolul mărimii de măsurat (de exemplu, $0...20\times10^2$ °C). Schema electrică de principiu este aceeaşi ca şi cea din figura 11.7, cu deosebirea că aparatelor indicatoare le lipseşte sistemul de înregistrare.

Toate aparatele de măsurare (indicatoare şi înregistratoare) au o precizie (eroare maximă) de 0,5%; de asemenea, *sensibilitatea* lor este de 0,1%. Se reaminteşte că sensibilitatea reprezintă abaterea minimă, exprimată în procente din valoarea maximă de pe scară la care aparatul (compensatorul) intră în funcţiune. De exemplu, compensatorul pentru semnal unificat 2—10 mA, cu sensibilitatea de 0,1%, reprezintă $1^0/_{00}$ din 10 mA adică 10 μA.

În afara funcţiilor principale de înregistrare sau indicare, aparatele IEA tip E pot îndeplini şi unele funcţii suplimentare, de exemplu *funcţia M* arată că aparatul este prevăzut cu contacte electrice care se comută (îşi schimbă poziţia) la depăşirea unei valori limită poziţia contactelor pe scară fiind reglabilă şi pusă în evidenţă printr-un reper roşu. Dacă aparatul are *funcţia B*, contactele nu sînt reglabile ci fixate pe scară la 0% şi 100% etc.

Alteori, aparatele au un cursor suplimentar cu ajutorul căruia se formează un semnal de tensiune (0,4—2 V) proporţional cu mărimea de măsurat ce poate fi transmis la distanţe *(funcţia T)* etc.

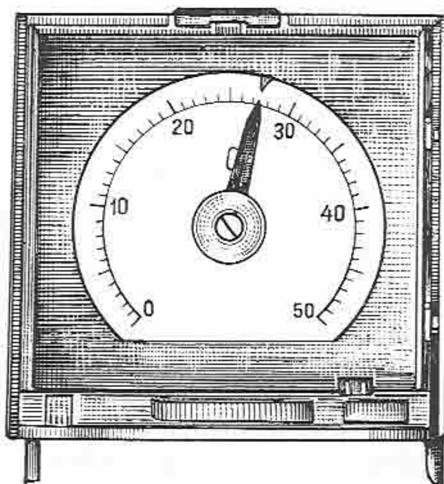


Fig. 11.9. Aparat electronic indicator.

4. APARATE INTEGRATOARE DE TIP E

Industria românească (IEA) realizează două tipuri de aparate integratoare pentru semnalul unificat 2—10 mA folosind o serie de elemente electronice, precum şi un contor mecanic avînd un număr maxim de şase cifre (vanguri).

Integratorul electronic liniar tip ELT 112 foloseşte pentru integrarea mărimii de măsurat un circuit *RC*, un generator de impulsuri autoblocat şi circuite de comandă şi stabilizare.

Indicaţia aparatului este 100, dacă timp de o oră semnalul de intrare este menţinut la valoarea sa maximă (10 mA).

Precizia de măsurare este de 1%; consumul este de circa 10 VA şi este alimentat la tensiunea de 220 V ± 10%, 50 Hz.

Integratorul electronic extractor de radical tip ELT 103 este realizat în special pentru măsurarea (contorizarea) debitului total *T* al unui fluid scurs într-un anumit timp prin măsurarea debitului *D* scurs în unitatea de timp. După cum se va vedea în capitolul 14, debitul parţial D (m³/h) se obţine comod folosindu-se traductoare de presiune diferenţiale ΔP (v. fig. 14.4).

La aceste tipuri de traductoare se obţine:

$$D(\mathrm{m^3/h}) = K\sqrt{\Delta P}, \qquad (11.15)$$

în care ΔP este dat în N/m².

Rezultă deci cantitatea totală de fluid:

$$T(\mathrm{m^3}) = \int_0^t D\,dt = K\int_0^t \sqrt{\Delta P}\cdot dt. \qquad (11.16)$$

Aceasta înseamnă că aparatul respectiv obţinînd o mărime proporţională cu ΔP de la traductorul de presiune, trebuie ca, înainte de a o integra, să efectueze o operaţie de extragere de radical din valoarea mărimii respective.

Performanţele tehnice ale acestui tip de integrator sînt aceleaşi ca şi la tipul precedent.

5. INSTALAŢII DE MĂSURARE CENTRALIZATE

Aceste instalaţii unice de măsurare cuprind numeroase locuri de măsurare pentru diferite mărimi precum şi prelucrarea automată a valorilor mărimilor măsurate.

Industria românească (IEA) fabrică o astfel de instalaţie de măsurare (control) automat centralizat, denumită MCC 200, avînd 200 de puncte de măsurare care, pe lîngă operaţia de indicare sau înregistrare a valorilor mărimilor măsurate, poate efectua şi unele operaţii de calcul simple (raportul valorilor a două mărimi, produsul lor etc.).

REZUMAT

- Elementul de bază în tehnica măsurării electrice a mărimilor neelectrice este *traductorul*.
- Pentru reducerea numărului de aparate și componente s-a procedat la unificarea elementelor de măsurare inclusiv a traductoarelor (exemplu sistemul E Unificat IEA)
- Traductoarele se clasifică după:

— mărimea de ieșire:
  - — parametrice;
  - — generatoare.

— mărimea de intrare:
  - — de temperatură;
  - — de viteză;
  - — de presiune;
  - — de debit;
  - — de nivel etc.

— conductiv:
  - — neunificate;
  - — unificate (de exemplu, curentul de ieșire $i_e = 2 ... 10$ mA).

- Aparatele electronice folosite în sistemul E (IEA) cuprind: înregistratoare, indicatoare, integratoare etc.

ÎNTREBĂRI RECAPITULATIVE

1. *Care este structura și cum se clasifică traductoarele?*
2. *Care sînt caracteristicile generale ale traductoarelor?*
3. *Care sînt realizările românești în domeniul aparatelor electronice de măsurare?*
4. *Ce avantaje prezintă sistemele unificare?*
5. *Cum funcționează integratoarele electronice?*

MĂSURAREA TEMPERATURII

A. NOŢIUNI PRIVIND TEMPERATURA

Temperatura *este o mărime fizică ce caracterizează gradul de încălzire al corpurilor* sau, cu alte cuvinte, este o măsură a intensităţii mişcării termice a particulelor elementare.

1. SCĂRI DE TEMPERATURĂ

Pentru determinarea practică a temperaturii trebuie aleasă o scară de temperatură, adică trebuie să se definească un şir continuu de numere, liniar legate de valorile numerice ale unei proprietăţi fizice, măsurabilă cît mai exact, de exemplu variaţia cu temperatura a volumului lichidelor şi gazelor, a rezistivităţii electrice a unor materiale etc.

Dacă se notează cu y această proprietate, atunci se poate scrie:

$$d\theta = a \cdot dy, \qquad (12.1)$$

în care:

a este coeficientul de proporţionalitate;
$d\theta$ — variaţia temperaturii.

Prin integrare se obţine:

$$\theta = ay + b, \qquad (12.2)$$

în care b este o constantă de integrare.

Pentru determinarea constantelor a şi b se aleg două temperaturi de bază, uşor reproductibile, cum ar fi, de exemplu, temperaturile de solidificare sau de fierbere ale substanţelor pure, cărora li se dau valori numerice arbitrare, θ_1 şi θ_2. Intervalul de temperatură $\theta_2 - \theta_1$, numit interval de bază, se împarte în n părţi egale şi a n-a parte a intervalului de bază se ia drept unitate numită grad.

Pe scara termometrelor de sticlă cu mercur s-au luat pentru θ_1 şi θ_2 temperatura de topire a gheţii şi temperatura de fierbere a apei la presiune normală iar ca proprietate fizică măsurabilă s-a luat dilatarea volumică a mercurului în învelişul de sticlă al termometrului.

Scara termometrului de sticlă a avut mai multe variante: scara Celsius, scara Réaumur şi scara Fahrenheit.

Scara Celsius: $\theta_1 = 0$ °C, $\theta_2 = 100$ °C, $n_C = 100$.
Scara Réaumur: $\theta_1 = 0$ °R, $\theta_2 = 80$ °R, $n_R = 80$.

Scara Fahrenheit: $\theta_1 = 32\ °F$, $\theta_2 = 212\ °F$, $n_F = 180$, în care θ_1 şi θ_2 sînt temperaturile de topire a gheţii, respectiv de fierbere a apei chimic pure la presiune normală ($1{,}013 \cdot 10^5\ N/m^2$).

Fiecăreia dintre aceste scări îi corespunde gradul Celsius, gradul Réaumur şi, respectiv, gradul Fahrenheit; fiecare grad este a n-a parte din intervalul de bază ($\theta_2 - \theta_1$) respectiv.

2. SCARA TERMODINAMICĂ

Această scară, construită iniţial pe baza a două puncte fixe, cel de topire a gheţii şi cel de fierbere a apei la presiune normală, notate respectiv cu 0 şi 100, poartă denumirea *de scară termodinamică centigrad*.

Orice număr care exprimă valoarea unei temperaturi la această scară este urmat de simbolul °C.

Scara termodinamică absolută de temperatură are valoarea unui grad egală cu aceea a gradului din scara termodinamică centigrad, originea scării fiind fixată la zeroul absolut al temperaturilor. Simbolul unei temperaturi măsurate în această scară este K (Kelvin). Deoarece în această scară temperatura de topire a gheţii este de 273,15 K, relaţia care leagă temperatura unui corp T, măsurată în scările absolută şi centigrad θ, va fi:

$$T = (273{,}15 + \theta)\ K, \qquad (12.3)$$

B. GENERALITĂŢI ASUPRA MIJLOACELOR DE MĂSURARE A TEMPERATURII

Pentru construirea mijloacelor de măsurare a temperaturii utilizate în tehnică se poate folosi, în principiu, legea de variaţie cu temperatura a oricărui parametru fizic. Aşa se explică apariţia unui număr mare de tipuri de termometre bazate pe cele mai variate proprietăţi fizice ale corpurilor.

Clasificarea generală a termometrelor în funcţie de proprietăţile fizice care s-au impus în realizarea unor termometre sau a unor traductoare de temperatură cu utilizare largă în tehnică este următoarea:

- termometre bazate pe dilatarea corpurilor
  - lichide
  - gaze
  - solide
  - vapori saturaţi
- termometre bazate pe schimbarea stării
  - topirea sau variaţia bruscă a viscozităţii unui corp
  - schimbarea culorii
- traductoare termometrice cu rezistenţă electrică
  - metalică
  - termistoare
- traductoare termometrice cu termocupluri
- traductoare termometrice (pirometre) bazate pe radiaţia termică a corpurilor
  - optice monocromatice
  - de radiaţie totală
  - de culoare

C. DESCRIEREA ȘI PRINCIPIILE DE FUNCȚIONARE ALE TERMOMETRELOR

1. TERMOMETRELE DE STICLĂ CU LICHID

Acest tip de termometru este folosit la măsurarea temperaturilor prin contact. Construcțiile clasice permit citirea indicațiilor numai la locul de măsurare. Ele sînt folosite în majoritatea cazurilor din industrie, deoarece asigură o precizie ridicată de măsurare, au un preț de cost redus, se montează și se întrețin ușor.

Termometrele de sticlă nu pot transmite la distanță variația temperaturii în mod continuu, ci numai un număr limitat de valori, dacă au fost construite în acest scop, numărul valorilor fiind limitat la numărul contactelor electrice prevăzute.

Termometrele cu lichid pot fi cu mercur, cu alcool, cu toluen, pentan, pentan tehnic, aliaj de galiu. Domeniul de utilizare este: 200 — 1050 °C.

Principiul de măsurare se bazează pe dilatarea lichidului sub acțiunea căldurii; acest fenomen are la bază legea:

$$V_2 = V_1 [1 + \alpha_{12}(\theta_2 - \theta_1)], \tag{12.4}$$

în care:

V_1 și V_2 sînt volumele lichidului la temperaturile θ_1 și θ_2;

α_{12} este coeficientul mediu de dilatare volumică a lichidului în intervalul de temperatură θ_1 și θ_2.

Construcția termometrului de sticlă cu lichid. Termometrul de sticlă cu lichid se compune dintr-un tub capilar cu secțiunea constantă (calibrat), închis la capătul superior. La capătul inferior se termină cu un rezervor în care se află lichidul termometric.

Din punct de vedere constructiv, termometrele de sticlă cu lichid se împart în:

— termometre cu capilar masiv sau baghetă (fig. 12.1,*a* ;

— termometre tubulare cu scară interioară drept sau cu cot (fig. 12.1, *b*, *c*);

— termometre cu capilar montate pe plăci sau scări gradate (fig. 12.1,*d*).

Construcții speciale:

— termometre pentru măsurarea diferențelor de temperatură de tip Bekmann (fig. 12.2). Ele măsoară diferențe de cel mult 5—6 grd pe diferite intervale de temperatură, cu o precizie mare;

— termometre cu contacte electrice, care pot fi de două feluri; cu contacte fixe și cu contacte mobile — Wertex.

Ambele tipuri se folosesc în schemele de reglare a temperaturii sau la semnalizarea depășirii unei anumite temperaturi a unui corp.

Termometrul de sticlă cu mercur cu contacte electrice fixe are introdus la partea inferioară a capilarului și la nivelul corespunzător temperaturii dorite

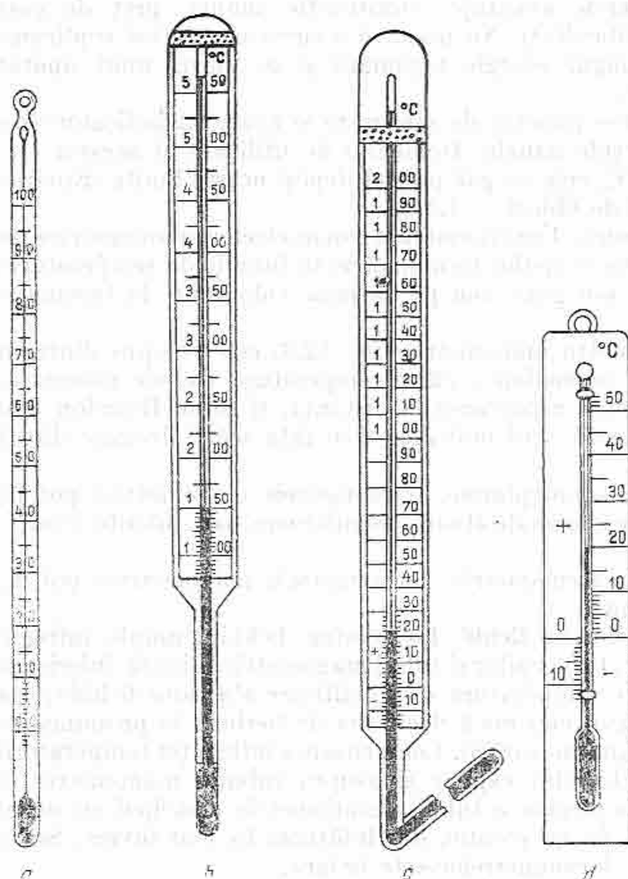


Fig. 12.1. Termometre cu lichid:
a — cu capilar masiv; b — tubular cu scară interioară drept; c — cubular cu scară interioară cu cot; d — cu capilar montat pe placă cu scară gradată.

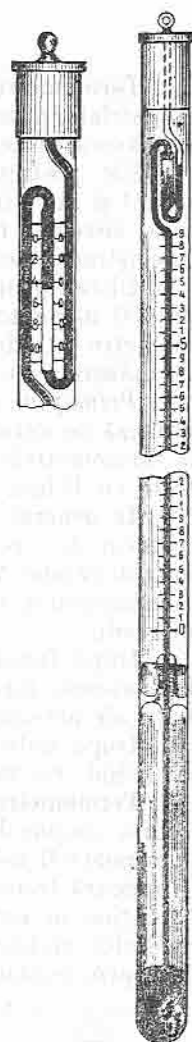


Fig. 12.2. Termometru Bekmann.

(sau la mai multe niveluri), în mod etanş, cîte un fir de platină care stabileşte contactul electric cu mercurul la nivelul respectiv. În acest fel, dacă meniscul mercurului din capilar atinge unul dintre contactele de pe capilar, coloana de mercur aflată între acest contact şi cel de la baza capilarului poate închide un circuit electric.

Termometrul de sticlă cu mercur cu contact electric mobil, cunoscut şi sub denumirea de termometru Wertex, are contactul de la baza tubului capilar fix, iar al doilea contact mobil.

2. TERMOMETRELE MANOMETRICE

Termometrele manometrice sînt de largă utilizare în numeroase aplicaţii industriale, printre care se menţionează măsurarea temperaturii apei de răcire şi măsurarea temperaturii fluidelor vehiculate prin conducte.

Ele prezintă următoarele avantaje: construcţie simplă, preţ de cost scăzut şi întreţinere fără dificultăţi. Nu necesită o sursă energetică suplimentară, sistemul furnizînd singur energia acţionării şi în cazul unui aparat înregistrator sau regulator.

Distanţa maximă dintre punctul de măsurare şi aparatul indicator este de 100 m pentru construcţiile uzuale. Domeniul de utilizare al acestor termometre este de 55—660 °C, cele cu gaz putînd depăşi aceste limite. Eroarea de măsurare nu depăşeşte de obicei $\pm$ 1,5%.

Principiul de funcţionare. Funcţionarea termometrelor manometrice se bazează pe variaţia presiunii corpului termometric în funcţie de temperatură, la termometrele cu vapori sau gaze, sau pe variaţia volumului, la termometrele cu lichid.

În general, un termometru manometric (fig. 12.3) este compus dintr-un rezervor *1*, care imersează în mediul a cărui temperatură trebuie măsurată, un tub capilar *2*, care permite racordarea la distanţă, şi tubul Bourdon *3* al manometrului, care antrenează acul indicator *4* în faţa scării divizate direct în grade.

După funcţia pe care o îndeplinesc, termometrele manometrice pot fi: indicatoare, înregistratoare, semnalizatoare, regulatoare sau diferite combinaţii ale acestora.

După natura corpului termometric, termometrele manometrice pot fi: cu lichid, cu vapori, cu gaz.

Termometre manometrice cu lichid. La acestea, lichidul umple întregul volum compus din rezervor, tub capilar şi tubul manometric. Limita inferioară care poate fi măsurată este temperatura de solidificare a acestor lichide; cea superioară trebuie să fie ceva mai mică decît cea de fierbere la presiunea ce se obţine în sistem în timpul măsurării. Compensarea influenţei temperaturii mediului ambiant asupra tubului capilar şi asupra tubului manometric se face prin cuplarea printr-o pîrghie a tubului manometric principal cu un al doilea identic, dar înfăşurat în sens invers. Scara termometrelor este liniară.

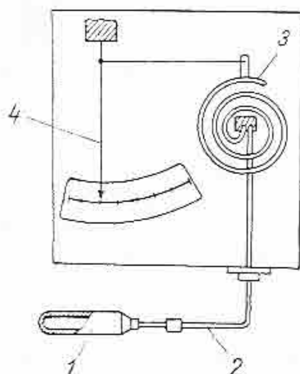


Fig. 12.3 Termometru manometric.

Lichidele folosite sînt: mercurul, amalgamul de taliu, alcoolul, xilenul şi hexanul. În cazul mercurului, toate componentele termometrului sînt de oţel. Pentru celelalte lichide, materialele cele mai utilizate sînt alama şi bronzul.

Termometre manometrice cu vapori. Aceste termometre au domeniul de măsurare mai restrîns. Scara este neliniară, însă prezintă avantajul unor timpi de răspuns mai mici. Constructiv, termometrele manometrice cu vapori saturaţi sînt asemănătoare celor cu lichid, diferenţa existînd la rezervor (tubul capilar pătrunde în lichid) şi la modul de umplere al acestuia (fig. 12.4).

Există două variante de umplere, în funcţie de temperatura măsurată după cum aceasta este superioară sau inferioară celei a mediului ambiant ţinîndu-se seamă anticipat de condensarea vaporilor în partea rece a sistemului. Astfel, în figura 12.4, *a* este reprezentată varianta pentru cazul în care temperaturile măsurate sînt mai mari decît cea a mediului ambiant, iar în figura 12.4,*b*, pentru măsurarea temperaturilor mai mici decît cea a mediului ambiant.

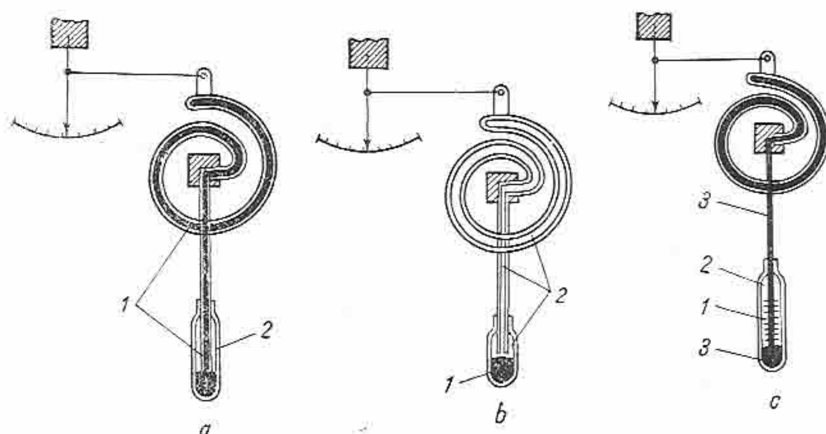


Fig. 12.4. Termometru cu vapori:

a — pentru temperaturi mai mari decît cea a mediului ambiant (*1* — lichid; *2* — vapori); *b* — pentru temperaturi mai mici decît cea a mediului ambiant (*1* — lichid; *2* — vapori); *c* — cu transmiterea prin lichid (*1* — lichid volatil; *2* — vapori; *3* — lichid nevolatil).

Termometre manometrice cu gaz. Termometre manometrice cu gaz au cea mai mică răspîndire, deoarece pentru reducerea influenţei variaţiilor de temperatură asupra capilarului, rezervorul are un volum mare.

La IAMC — Otopeni se fabrică termometre manometrice semnalizatoare, regulatoare şi înregistratoare.

D. MĂSURAREA TEMPERATURILOR CU TERMOCUPLUL

Termocuplul este folosit pe scară largă la măsurarea temperaturilor cuprinse între —100 şi +1300 °C. În unele cazuri, termocuplul poate măsura temperaturi în limite şi mai largi (între —200 şi + 2000 °C).

Avantajele termocuplurilor constau în: precizie mare, posibilitatea transmiterii semnalelor la distanţă şi posibilitatea verificării temperaturii în mai multe puncte în care se montează cîte un termocuplu (folosindu-se un comutator care comută aparatul indicator pe rînd la fiecare dintre termocupluri).

Principiul de funcţionare. Măsurarea temperaturilor cu termocuplul se bazează pe fenomenul termoelectric, şi anume: dacă într-un circuit format din două conductoare din materiale diferite A şi B (fig. 12.5) şi sudate la cele două extremităţi se încălzeşte unul dintre cele două puncte de contact, în circuit apare o tensiune electromotoare care este funcţie de temperatura celor două extremităţi. Tensiunea electromotoare care apare datorită încăl-

zirii celor două conductoare din materiale diferite sudate între ele se numește *tensiune termoelectromotoare* (prescurtat t.t.e.m.). Așadar, termocuplurile constituie traductoare generatoare de temperatură.

Dacă se notează cu θ temperatura sudurii calde *1* și cu θ_0 temperatura sudurii reci *2*, atunci t.t.e.m. va fi:

$$e_{AB}(\theta, \theta_0) = e_{BA}(\theta) - e_{BA}(\theta_0). \quad (12.5)$$



Fig. 12.5. Cuplu termometric compus din două conductoare diferite.

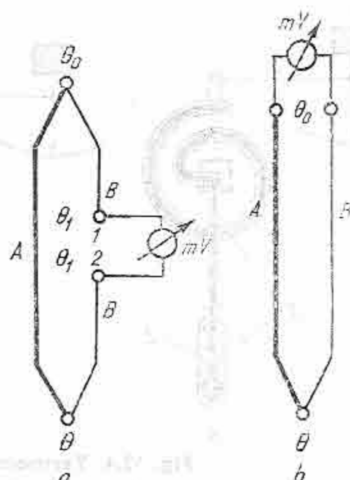


Fig. 12.6. Conectarea milivoltmetrului pirometric:
a — prin întreruperea unui termoelectrod; *b* — în locul sudurii reci.

Dacă temperatura sudurii *2* este menținută constantă, atunci t.t.e.m rezultantă va fi:

$$e_{AB}(\theta, \theta_0) = e_{BA}(\theta) - C = f(\theta). \quad (12.6)$$

Pentru măsurarea t.t.e.m. se utilizează un milivoltmetru sau o punte de compensare (potențiometru).

Conectarea milivoltmetrului se face prin întreruperea circuitului (fig. 12.6, *a*) sau în locul sudurii reci (fig. 12.6, *b*).

Pentru caracterizarea metalelor din punctul de vedere al tensiunii termoelectromotoare s-a ales un termoelectrod de referință (normal), platina, deoarece are un punct ridicat de topire și se obține ușor în stare pură. Astfel, se dau tabele cu valorile t.t.e.m. ale fiecărui metal în raport cu platina, cu ajutorul lor putîndu-se calcula t.t.e.m. care apare între două metale diferite, folosite la confecționarea electrozilor (tabelul 12.1). De exemplu, la temperatura $\theta = 100\,°C$ și temperatura sudurii reci $\theta_0 = 0\,°C$, termoelectrozii de cromel și alumel dezvoltă în cuplu cu platina următoarele tensiuni:

$$e_{C,\,Pt}(100\,°C,\ 0\,°C) = +\,3{,}13\ \text{mv};$$

$$e_{A,\,Pt}(100\,°C,\ 0\,°C) = -\,1{,}02\ \text{mv}.$$

TABELUL 12.1

Metale utilizate în construcția termocuplurilor

Metalul	Tensiunea electromotoare raportată la platină, la o diferență de temperatură de 0...100 °C
Constantan (Const)	−3,47 ... −3,04
Nichel (Ni)	−1,94 ... −1,20
Paladiu (Pd)	−0,28
Platină (Pt)	0
Wolfram (W)	+0,65 ... +0,90
Platinorodiu (PtRh) cu 10% Rh	+0,65
Argint (Ag)	+0,67 ... +0,79
Cupru (Cu)	+0,72 ... +0,77
Aur (Au)	+0,56 ... +0,80
Manganin (Mang)	+0,57 ... +0,82
Fier (Fe)	+1,87 ... +1,89
Nichel-crom (NiCr)	+2,20

Tensiunea termoelectromotoare dintre cromel și alumel se determină cu relația:

$$e_{(C,A)}(100\,^\circ C,\ 0\,^\circ C) = e_{CP_t}(100\,^\circ C,\ 0\,^\circ C) - e_{AP_t}(100\,^\circ C,\ 0\,^\circ C) =$$

$$= 3{,}13 - (-1{,}02) = 4{,}15 \text{ mV}. \quad (12.7)$$

Materialele folosite pentru confecționarea termocuplurilor sînt:

— *pentru temperaturi pînă la 1100 °C — metale și aliaje obișnuite*, ca: fierul, cuprul, constantanul, cromelul (90% Ni + 10% Cr), alumelul (95% Ni + procente de Mn, Al, Si, Fe), copelul (56% Cu + 44% Ni), cromul etc.;

— *pentru temperaturi cuprinse între 1100 și 1600 °C* — metale nobile, ca aurul, argintul, platina, iridiul etc.;

— *pentru temperaturi care depășesc 1600 °C — materiale greu fuzibile (refractare)*, cum sînt: wolframul, molibdenul, carbura de siliciu etc.

Tensiunile termoelectromotoare obținute de la termocupluri sînt de obicei cuprinse între 5 și 50 mV.

Industria românească (IEA) fabrică o mare varietate de termocupluri din diverse materiale și pentru mai multe game de temperaturi.

Folosite în combinație cu adaptorul rezistență-curent tip ELT 161 (fig. 11.6), termocuplurile pot constitui traductoare unificate de temperatură.

E. MĂSURAREA TEMPERATURILOR CU TERMOREZISTENȚE

Termorezistențele sînt utilizate pe scară largă în industrie la măsurarea temperaturilor cuprinse între −200 și +850 °C.

Principiul de măsurare se bazează pe proprietatea unor conductoare sau semiconductoare de a-și modifica rezistența electrică cu temperatura. Aceste conductoare trebuie să aibă un coeficient de variație a rezistivității cu temperatura cît mai mare, iar variația rezistivității lor cu temperatura

să fie cît mai liniară. Din această categorie de materiale fac parte: platina, cuprul, nichelul, fierul, precum și unele aliaje.

Metalele au o variație a rezistivității electrice cu temperatura exprimată prin relația:

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha t - \beta t^2). \tag{12.8}$$

Valoarea rezistenței la 0 °C se ia cel puțin egală cu 40 Ω, iar valoarea maximă nu depășește 100 Ω.

Termorezistențele se construiesc din fire sau benzi care se înfășoară pe un suport special. Astfel, pentru temperaturi mari, suporții vor fi de cuarț și porțelan, iar pentru temperaturi joase — de mică.

Termistoarele sînt termorezistențe semiconductoare și au un coeficient de variație a rezistenței cu temperatura negativ. Acesta are însă valoare mare, sensibilitatea (panta) traductoarelor cu termistoare fiind cu atît mai mare cu cît temperaturile sînt mai scăzute. De exemplu, pentru o încălzire în același interval de la 0 la 100 °C, o termorezistență confecționată din cupru (conductor) își sporește rezistența de la 100 la 140 Ω, în timp ce altă termorezistență — termistor — din oxid cupros (semiconductor) scade de la 1 000 la 50 Ω.

F. APARATE DE MĂSURARE CU TERMOCUPLURI

Aparatele de măsurare cu termocupluri se pot grupa în două categorii: milivoltmetre pirometrice și compensatoare.

Diversele tipuri de milivoltmetre pirometrice care se fabrică în prezent pot fi grupate în aparate indicatoare, înregistratoare și regulatoare, după cum temperatura măsurată este indicată, înregistrată sau reglată.

1. MILIVOLTMETRELE PIROMETRICE

Milivoltmetrele pirometrice indicatoare. Acestea se construiesc ca aparate de laborator de clasă 1 și ca aparate industriale de clasă 1,5.

Instrumentele de panou au un domeniu de măsurare de minimum 8 mV și o rezistență internă de circa 10—30 Ω/mV. Pentru exemplificare se va descrie milivoltmetrul indicator tip ET-M, model MV-3, fabricat în țara noastră. Aparatul (fig. 12.7) se execută pentru a fi racordat la un termocuplu PtRh-Pt, cromel-alumel, NiCr-Ni, cromel-copel sau Fe — constantan.

Milivoltmetrul face parte din categoria aparatelor magnetoelectrice și se montează pe panou în sistem îngropat în poziție orizontală. Aparatele trebuie ferite pe cît posibil de medii cu praf sau umiditate excesivă, de vibrații sau șocuri mecanice, iar temperatura de lucru trebuie să nu depășească 40—45 °C. Caracteristicile principale ale aparatului sînt:

— clasa de precizie: 1,5;
— curentul de lucru în bobină: 0,04—0,06 mA;
— unghiul maxim de deviație: 60 °;

— lungimea totală a scării gradate: 155 mm;
— rezistența internă: 250 Ω;
— rezistența circuitului exterior: 10 Ω.

Milivoltmetre pirometrice înregistratoare. În ordinea evoluției se deosebesc milivoltmetre pirometrice cu înregistrare: prin puncte, prin linie continuă și prin afișare numerică. Aparatele se construiesc pentru înregistrarea unei singure temperaturi sau cu mai multe căi: 3, 6, 12 etc.

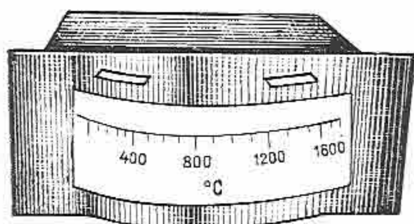


Fig. 12.7. Milivoltmetru de panou tip ET-M.

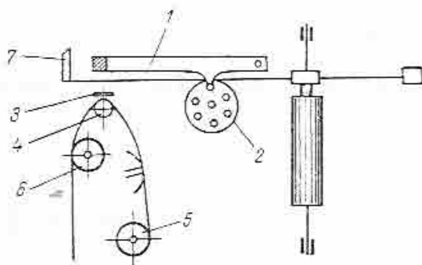


Fig. 12.8. Schema de principiu a unui milivoltmetru pirometric cu înregistrare prin puncte.

Milivoltmetrul pirometric cu înregistrare prin puncte. Acest aparat (fig. 12.8) este prevăzut cu motor sincron auxiliar sau cu un mecanism cu arc armat manual care pune în mișcare tot mecanismul. Discul cu știfturi *2* se rotește uniform și permite astfel prin intermediul unei lamele elastice coborîrea periodică a cursorului mobil *1* la fiecare 20 s. La fiecare coborîre a acestuia pe acul indicator *7*, datorită apăsării panglicii colorate *3*, pe banda de hîrtie se obține un punct colorat. Hîrtia de pe ruloul *5* este pusă în mișcare prin intermediul tamburului *6*, ale cărui proeminențe pătrund în perforațiile corespunzătoare ale diagramei, fiind trasă prin ghidajul *4*. Viteza de deplasare a hîrtiei este de 15—240 mm/h.

Aparatele construite pentru înregistrarea mai multor temperaturi sînt echipate cu un comutator care leagă succesiv aparatul cu diversele termocupluri și cu un dispozitiv automat de schimbare a panglicii, care la fiecare comutare pune sub ac panglica corespunzătoare. Un indicator permite să se cunoască numărul și culoarea căii măsurate.

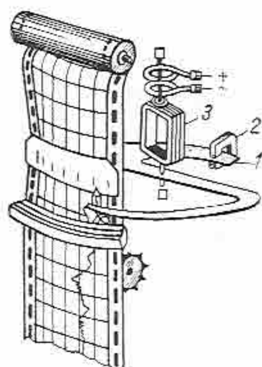


Fig. 12.9. Schema de principiu a unui milivoltmetru pirometric cu înregistrare continuă.

Milivoltmetre pirometrice cu înregistrare continuă. Acest tip de aparat (fig. 12.9) se folosește pentru înregistrarea temperaturilor rapid variabile. Pentru amortizarea oscilațiilor bruște, aparatul este prevăzut cu o frînă magnetică din tablă de aluminiu *1*, care trece fără frecare prin întrefierul unui magnet permanent *2*. Această tablă fiind solidară în zona centrală cu cadrul mobil *3*, permite înregistrarea pe bandă, cu cealaltă extremitate a sa, în care este fixată o peniță.

Milivoltmetrul pirometric cu afișare numerică. Deși de apariție recentă, acest aparat este mult răspîndit în prezent, soluțiile adoptate fiind în funcție de precizia și viteza impusă și de gabaritul admis. Utilizarea clasică

a acestor aparate constă în efectuarea automată a unor măsurări periodice, cu afişarea şi înregistrarea rezultatelor sub formă numerică.

Milivoltmetrul numeric automat prezintă următoarele caracteristici generale:

— *capacitatea:* 50 de intrări curent continuu de maximum 100 mV;

— *afişarea:* maşină de scris, indicînd rezultatele şi numerele de ordine ale căilor corespunzătoare;

— *precizia:* rezultatul este exprimat prin patru cifre, dintre care ultima reprezintă zeci de microvolţi;

— *viteza:* o măsurare necesită 4 s.

Milivoltmetre pirometrice regulatoare. Aceste aparate se utilizează în special pentru reglarea temperaturii între două valori prescrise.

2. COMPENSATOARELE

Compensatoarele sînt aparate care măsoară tensiunile termoelectromotoare. Metodele de măsurare au fost descrise la capitolul respectiv.

Din punct de vedere constructiv, compensatoarele se pot grupa în compensatoare *portabile* (de laborator) şi *de panou* (automate şi înregistratoare). Dintre acestea din urmă, cele mai răspîndite sînt compensatoarele electronice automate.

Compensatorul electronic automat (fig. 12.10) utilizează pentru măsurarea t.t.e.m. o punte Wheatstone conectată permanent la o tensiune continuă constantă E. Cu un cursor mobil K acţionat de un motor reversibil M se culege de pe o rezistenţă variabilă ρ a punţii o tensiune U_c corespunzătoare poziţiei respective a cursorului. Tensiunea U_c din diagonala punţii se conectează în opoziţie cu t.t.e.m. de măsurat U_m. Dacă între această tensiune şi t.t.e.m. există o diferenţă ΔU, ea este aplicată motorului reversibil M prin intermediul înfăşurării de excitaţie B. Motorul este astfel conectat, încît sensul lui de rotaţie să anuleze diferenţa de tensiune şi să se menţină egalitatea acestora cu o precizie de 0,1% din valoarea maximă a scării.

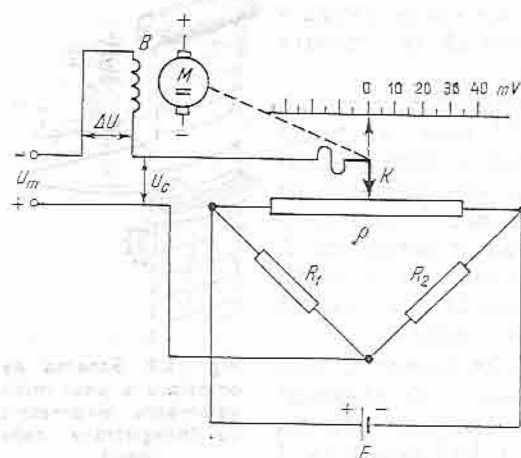


Fig. 12.10. Schema compensatorului electronic automat portativ PP.

În ultimii ani, evoluția compensatoarelor electronice automate a avut ca obiective reducerea greutății și simplificarea exploatării. Un prim pas l-a constituit folosirea amplificatoarelor tranzistorizate, astfel de aparate fabricîndu-se în prezent la IEA — București.

G. APARATE DE MĂSURARE CU TERMOREZISTENȚĂ

În practică, pentru măsurarea rezistenței electrice a termorezistenței se folosesc logometre (indicatoare, înregistratoare și regulatoare) și punți manuale sau automate. Pentru măsurări de precizie se folosesc și compensatoare automate, montate în scheme speciale.

H. TERMOMETRE DE RADIAȚIE (pirometre)

După cum s-a arătat la paragrafele anterioare, termocuplurile sînt utilizabile numai condiționat la temperaturi de peste 1 300 °C, iar termometrele cu rezistență electrică se pot utiliza pînă la maximum 850 °C. Temperaturile înalte pot fi însă măsurate prin radiația termică emisă de obiectul de măsurat. În acest caz, instrumentul de măsurat nu are contact direct cu obiectul și se încălzește numai în măsură redusă.

Un astfel de aparat de măsurare a temperaturii se numește *termometru de radiație* sau *pirometru de radiație* sau, simplu, *pirometru*. Există mai multe tipuri de astfel de aparate, funcționînd după principii diferite. Majoritatea lor pot fi însă considerate ca traductoare de măsurare electrice.

Termometrul (pirometrul) cu radiație totală. La acest pirometru, întreaga radiație emisă de obiectul care se măsoară sau cel puțin radiația unui domeniu spectral întins este utilizată la măsurarea temperaturii. În figura 12.11 este reprezentat schematic un sistem folosit frecvent. Radiația R concentrată de obiectivul *1* (în unele construcții și de o oglindă concavă) pe placa de captare *3* din metal înnegrit, încălzește termocuplul *4*. Tensiunea termoelectromotoare produsă este transmisă sistemului de măsurare *5*, cu cadru mobil,

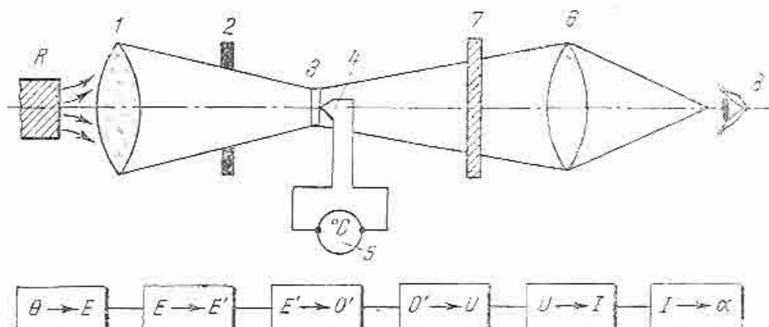


Fig. 12.11. Termometru cu radiație totală:
θ — temperatura de măsurat; E — energia radiației totale; E' — energia radiației filtrate prin obiectiv; θ' — temperatura plăcuței captatoare; U — tensiunea termoelectromotoare; I — curentul aparatului de măsurat; α — deviația aparatului de măsurat.

care indică direct temperatura obiectului. Pirometrul conţine, de asemenea, un ocular *6*, care permite să se pună la punct instrumentul pe obiect. Pentru protejarea ochiului, înaintea lentilei *6* se amplasează un filtru *7*. În scopul măririi sensibilităţii, receptorul de radiaţii, constînd din plăcuţe de metal şi termocuplu, este montat în general într-un balon de sticlă de cuarţ, în care s-a făcut vid sau care este umplut cu gaz.

Schema de funcţionare din figura 12.11 arată transformările care au loc la măsurarea cu termometre de radiaţie totală.

În ţara noastră se fabrică un traductor de radiaţii infraroşii tip K 42, care în combinaţie cu adaptorul ELT 150 elaborează semnalul unificat $i =$ 2...10 mA pentru diverse domenii de măsurare a temperaturii: 600—1 400 °C, 700—1 500 °C, 1 000—2 000 °C.

REZUMAT

- Pentru măsurarea temperaturilor se folosesc următoarele scări: Celsius, Réaumur, Fahrenheit şi Kelvin (termodinamică).
- În funcţie de principiul de realizare se construiesc termometre folosind:
  — dilatarea corpurilor;
  — schimbarea stării de agregare;
  — termorezistenţe;
  — termocupluri;
  — pirometre de radiaţie.

ÎNTREBĂRI RECAPITULATIVE

1. *Care sînt caracteristicile fiecărei scări de temperatură?*
2. *Care sînt principiile de funcţionare ale fiecărui tip de termometru?*
3. *Ce deosebire există din punct de vedere termometric între termorezistenţele conductoare şi cele semiconductoare (termistoare)?*
4. *Care este principiul de funcţionare al termocuplului?*
5. *Care sînt realizările din ţara noastră în domeniul măsurării temperaturilor?*

MĂSURAREA TURAȚIEI

A. MĂSURAREA TURAȚIEI CU TAHOMETRUL CU CURENȚI TURBIONARI

Tahometrul cu curenți turbionari are o largă utilizare, deoarece se poate construi pentru domenii de măsurare cuprinse între 20 și 10 000 rot/min. În figura 13.1 este reprezentată o secțiune printr-un astfel de aparat. El este prevăzut cu doi magneți *1*, *2* cu 4—8 poli. Aceștia sînt puși în mișcare de arborele a cărui turație se măsoară. Liniile de forță ale magneților intersectează tamburul *3*, de cupru sau aluminiu, care se poate roti în lagăre, și parcurg apoi inelul fix de fier *4*, de închidere a circuitului magnetic. În tambur se induc astfel tensiuni proporționale cu turația n ce se măsoară. Acestea, la rîndul lor, provoacă curenții turbionari. În interacțiune cu liniile de forță magnetică, aceștia produc un cuplu de torsiune:

$$M_1 = c_1 \frac{p\Phi^2 n}{\rho}, \qquad (13.1)$$

în care:

c_1 este o constantă depinzînd de dimensiunile dispozitivului;
p — numărul de perechi de poli;
Φ — fluxul magnetic al unui pol;
ρ — rezistivitatea tamburului.

Cuplul M_1 produce o torsiune a tamburului, torsiune care încarcă arcul *5*. Apare astfel un cuplu de torsiune antagonist M_2, proporțional cu unghiul de torsiune:

$$M_2 = c_2\alpha. \qquad (13.2)$$

Tamburul *3* ajunge în stare de repaus atunci cînd cuplul motor este egal cu cuplul antagonist:

$$c_1 \frac{p\Phi^2 n}{\rho} = c_2\alpha \qquad (13.3)$$

sau

$$\alpha = \frac{c_1}{c_2} \cdot \frac{p\Phi^2 n}{\rho}. \qquad (13.4)$$

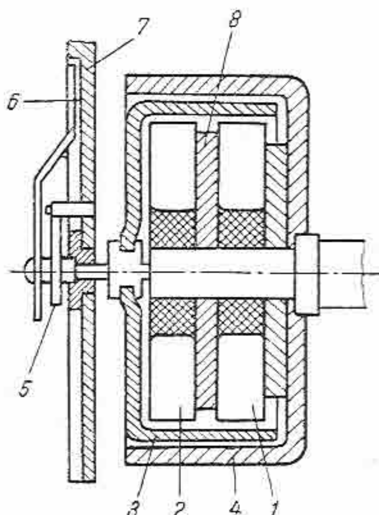


Fig. 13.1. Tahometru cu curenți turbionari.

Grupîndu-se toate valorile fixe într-o constantă c, rezultă deviația:

$$\alpha = cn, \tag{13.5}$$

dată de acul indicator.

Această indicație este deci proporțională cu turația de măsurat. Deviația maximă este, în general, de 270°. În figura 13.2 este reprezentată schema funcțională a unui tahometru cu curenți turbionari, schemă care explică fenomenele descrise mai sus.

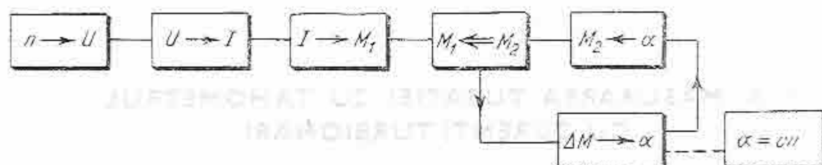


Fig. 13.2. Schema funcțională a unui tahometru cu curenți turbionari:
n — turația de măsurat; U — tensiunea indusă în tambur; I — curentul în tambur; M_1 — cuplul motor; M_2 — cuplul antagonist; α — deviația echipajului mobil; c — constanta aparatului.

La acest sistem de tahometru, rezistența tamburului depinde de temperatură, ceea ce provoacă erori de măsurare. Pentru compensarea acestor erori se aplică pe magnet o fișie 8 (fig. 13.1), denumită „termoperm". Această fișie formează un șunt magnetic a cărui rezistență crește cu creșterea temperaturii.

Tahometrul cu curenți turbionari nu prezintă avantajul majorității dispozitivelor electrice de măsurare, de a se putea transmite indicațiile sale la distanță. Acest inconvenient se poate totuși elimina cuplîndu-se tahometrul, ca orice aparat de măsurare neelectric, cu un traductor la distanță.

B. MĂSURAREA TURAȚIEI CU TRADUCTORUL DE TURAȚIE (Tahogenerator)

Din cele relatate la paragraful precedent rezultă că tahometrul cu curenți turbionari reprezintă o combinație de generator electric cu un dispozitiv de măsurare electric. Dacă se separă dispozitivul de măsurare de generator, se obține un mijloc de măsurare cu care se poate efectua o transmisie la distanță. Tahogeneratorul (traductor generator de turație) se construiește pentru tensiune continuă sau alternativă.

În cele ce urmează se vor prezenta traductoarele de tensiune alternativă. Ele se construiesc în două variante: traductoare de turație monofazate și traductoare de turație polifazate.

1. TRADUCTOARELE DE TURAȚIE MONOFAZATE

Traductoarele de turație monofazate se construiesc pentru turații de 140—3 000 rot/min. Generatorul 1 (fig. 13.3) este prevăzut cu bobine fixe și magneți rotativi. Se construiește în variante de la 1 la 12 perechi de poli.

Statorul este construit din tole de oțel electrotehnic prevăzute cu crestături pentru bobinaj.

Tensiunea ce se produce la turația maximă este cuprinsă, la diferitele modele, între 15 și cîteva sute de volți.

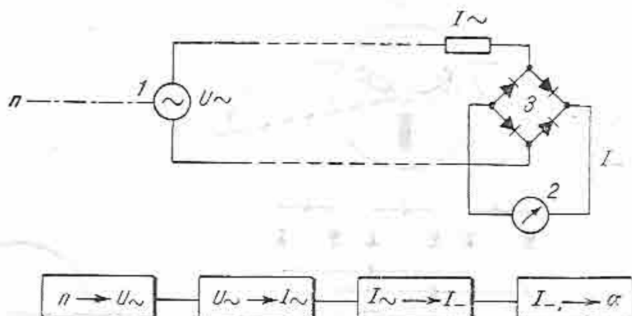


Fig. 13.3. Instalația de măsurare a turației cu traductor de tensiune alternativă:
n — turația de măsurat; $U_{\sim}$ — tensiunea traductorului; $I_{\sim}$ — curentul în conductorul de transmisie; I_{-} — curentul în dispozitivul de măsurare; α — deviația dispozitivului de măsurare.

Ca receptor se folosește exclusiv un aparat magnetoelectric *2* cu redresoarele *3*. În figura 13.3 este reprezentată schema electrică, precum și schema funcțională a instalației de măsurare.

2. TRADUCTOARE DE TURAȚIE POLIFAZATE

Traductoarele de turație polifazate se folosesc în general pentru măsurarea turațiilor mici. În figura 13.4 este reprezentată schema unui astfel de traductor *TG*. Aparatul are forma unui micromotor și este prevăzut cu un bobinaj din sîrmă cu rezistivitate mare. Pe lîngă diodele redresoare, în aparat este cuprinsă și o rezistență de bobină *R*. Aparatul furnizează dispozitivului de măsurat un curent continuu I_m. Curentul este proporțional cu turația și, practic, nu depinde de rezistența conductorului de legătură și a sarcinii. Eroarea de temperatură poate fi neglijată.

C. MĂSURAREA TURAȚIEI PRIN IMPULSURI

Rezultate bune în măsurarea turației se pot obține și prin folosirea impulsurilor electrice. Pentru producerea impulsurilor, ca și pentru utilizarea lor în scopul urmărit, se folosesc multe metode, dintre care în cele ce urmează vor fi descrise cîteva:

Producerea impulsurilor se poate realiza astfel:

— *pe cale mecanică*, prin contacte acționate de arborele a cărui turație se măsoară;

— *prin folosirea unui tahogenerator pentru tensiune alternativă*, care produce tensiunea la o frecvență proporțională cu turația;

— *prin utilizarea unui traductor inductiv de impulsuri.* Acest instrument, folosit împreună cu tahogeneratorul, constă în forma sa simplă în dispozitivul reprezentat în figura 13.5. Un mic magnet *2*, aplicat pe axul *1* a cărui turație se măsoară, induce la fiecare rotație în bobina *3* un impuls de tensiune;

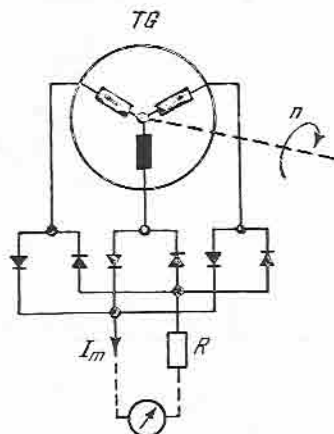


Fig. 13.4. Schema traductorului de turație polifazat.

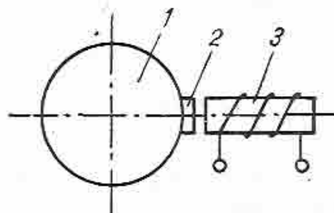


Fig. 13.5. Schema unui traductor inductiv de impulsuri.

— *pe cale fotoelectrică.* Dispozitivul reprezentat schematic în figura 13.6 poate fi utilizat în acest scop. Lumina emisă de lampa electrică *2* (alimentată de sursa *1*) este proiectată de sistemul optic constînd din lentilele *3* și *4* pe celula fotoelectrică *7*. Între lentile este montat arborele a cărui turație se măsoară, prevăzut cu un disc *5*, în care s-a practicat un orificiu ce permite trecerea luminii pentru un timp foarte scurt la fiecare rotație. Celula fotoelectrică *7*, din circuitul sursei *6*, impresionată de această rază de lumină, emite în timpul fiecărei rotații un impuls de curent, transformat de rezistența *8* într-un impuls de tensiune U_e.

Măsurarea frecvenței impulsurilor se realizează prin mai multe metode:

— *măsurarea directă* se poate efectua prin utilizarea frecvențmetrului cu lamele vibrante, în cazul în care pentru producerea impulsurilor s-a folosit un tahogenerator;

— *transformarea frecvenței impulsurilor în mărimi de curent continuu* constituie o altă metodă de măsurare. În cele mai multe cazuri, metoda constă în încărcarea și descărcarea periodică a unei capacități de către fiecare impuls. Curentul de încărcare are o valoare medie proporțională cu frecvența căutată;

— *măsurarea frecvenței impulsurilor cu contoare electronice de impulsuri* se realizează în condiții optime.

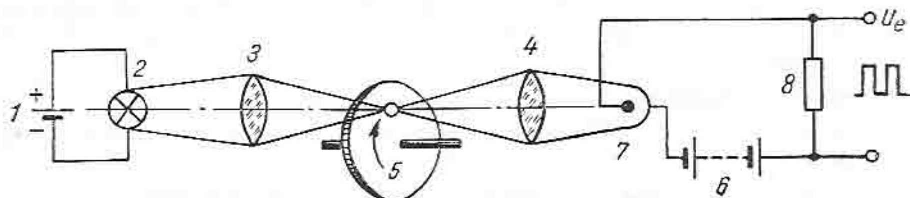


Fig. 13.6. Producerea fotoelectrică a impulsurilor.

D. MĂSURAREA STROBOSCOPICĂ A TURAȚIEI

Pentru măsurarea turațiilor mari se folosește metoda stroboscopică. Stroboscopul este un aparat care permite observații vizuale întrerupte periodic. Obiectul în rotație, a cărui turație urmează să se măsoare, se privește cu un stroboscop și se află turația căutată din frecvența stroboscopică. Aparatul cuprinde ca parte componentă esențială un tub electronic fără inerție, umplut cu neon.

Schema de principiu a acestui tub este reprezentată în figura 13.7. La grila tubului se aplică impulsuri periodice cu frecvență reglabilă. Tubul se aprinde la fiecare impuls și emite o sclipire luminoasă foarte intensă, care durează circa 10 μs. În acel moment se descarcă condensatorul C, încărcat în pauzele dintre impulsuri prin rezistența R de la sursa E.

Fig. 13.7. Schema de principiu a unui tub cu neon.

Dacă un corp care se rotește cu turația n_x este luminat cu un stroboscop cu sclipire luminoasă și dacă se reglează astfel frecvența sclipirilor n_s încît să se vadă un reper mobil ca avînd o imagine fixă, atunci

$$n_x = K n_s. \quad (13.6)$$

Factorul K poate fi determinat cu ușurință dacă se cunoaște ordinul de mărime al lui n_x.

REZUMAT

Măsurarea turației se poate face:
- cu tahometrul cu curenți turbionari;
- cu tahogeneratorul;
- prin impulsuri;
- stroboscopic.

ÎNTREBĂRI RECAPITULATIVE

1. *Cum funcționează tahometrul cu curenți turbionari și ce deosebire principială este între acesta și tahogenerator?*
2. *Cum se realizează măsurarea frecvenței la traductoarele prin impulsuri?*
3. *Ce tip de lampă este folosit în cazul aplicării metodei stroboscopice și de ce?*

C A P I T O L U L 14

MĂSURAREA PRESIUNII, A DEBITULUI ŞI A NIVELULUI

A. MĂSURAREA PRESIUNII

1. INTRODUCERE

Prin măsurarea presiunii se caută să se determine forța specifică pe care o exercită fluidele în rezervoare, conducte, canale etc. Aparatele pentru măsurarea presiunii poartă denumirea generală de *manometre*. Unitatea de măsură a presiunii în sistemul internațional de unități (SI) este N/m^2

În tehnică se mai foloseşte şi kgf/cm^2 sau atmosfera tehnică (at).

$$1 \text{ at} = 1 \text{ kgf/cm}^2 = 9{,}81 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$$

şi submultiplul acesteia *

$$1 \text{ mm } H_2O = \frac{1}{10^4} \text{ at} = 9{,}81 \text{ N/m}^2.$$

2. MANOMETRUL CU TUB

Manometrul cu tub este realizat dintr-un tub de sticlă S în formă de U (fig. 14.1, *a*), în care se află un lichid de densitate cunoscută, de exemplu mercurul (Hg), şi avînd capetele libere A şi B.

Racordat la presiunea de măsurat P cu una dintre extremități, de exemplu A, manometrul va indica această presiune ** sub forma diferenței de nivel Δh ce se creează între extremitățile coloanei de mercur, extremitatea B a tubului fiind în comunicație cu presiunea atmosferică.

Dacă presiunea de măsurat este sub cea atmosferică, Δh va avea semnul schimbat.

Elementul descris poate fi folosit ca manometru diferențial, dacă la cele două capete se racordează presiunile P_1 şi P_2, indicația Δh fiind proporțională cu diferența $P_1 - P_2$.

---

* 1 mm H_2O reprezintă fizic presiunea care echilibrează o coloană de apă cu înălțimea de 1 mm.

** Este vorba de fapt de suprapresiune (peste cea atmosferică).

3. MANOMETRUL CU REZERVOR

Manometrul cu rezervor (fig. 14.1,*b*) este similar celui precedent, cu deosebirea că unul dintre braţe reprezintă un vas *V* cu secţiune foarte mare în raport cu tubul *T*. În acest caz, scăderea de nivel Δh a mercurului în vasul *V* este neglijabilă în raport cu înălţimea *h* a coloanei de mercur.

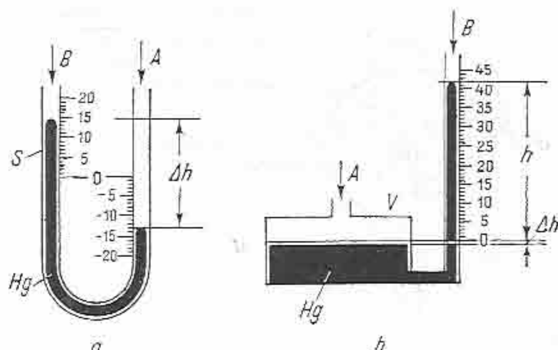


Fig. 14.1. Manometru cu mercur:
a — cu tub în formă de U; *b* — cu rezervor.

4. MANOMETRUL CU TUB BOURDON

Manometrul cu tub Bourdon este realizat sub forma unui tub metalic (Bourdon) al cărui principiu de funcţionare este reprezentat în figura 14.2, *a*, cu observaţia că pe axul *c* se află un ac indicator (nefigurat) ce se deplasează cu unghiul α în faţa unui cadran gradat (nefigurat).

5. TRADUCTORUL DE PRESIUNE CU TUB BOURDON

Elementul sensibil este un tub Bourdon *T* (fig. 14.2, *a*), care sub acţiunea presiunii de măsurat *P* tinde să se îndrepte (poziţia punctată). Pe măsura creşterii presiunii *P* aplicate, capătul liber al tubului se îndepărtează (tubul se destinde), astfel încît punctul de articulaţie *a* se deplasează în *a'*. Prin intermediul bielei *B*, manivela *M* este rotită (punctul *b* se deplasează în *b'*) în jurul punctului *c* cu unghiul α. Rotirea α este aplicată modulatorului magnetic din adaptorul ELT 370 (v. fig. 11.3 şi 11.4), care produce la ieşire un semnal unificat 2—10 mA proporţional cu presiunea *P*. Semnalul respectiv poate fi aplicat unui aparat electronic indicator (v. fig. 11.9) care afişează (indică) presiunea măsurată, sau unui aparat electronic înregistrator (v. fig. 11.8) care poate înregistra variaţia în timp a mărimii respective. În sfîrşit, semnalul respectiv poate fi introdus într-o instalaţie de automatizare, de exemplu, de reglare automată a presiunii.

Tubul Bourdon este realizat din bronz pentru fluide neutre sau din oţel inoxidabil pentru fluide corozive. Indicativul de fabricaţie românească (IEA) al acestui tip de traductor de presiune este: AT 10 ELT 370.

6. TRADUCTORUL DE PRESIUNE CU MEMBRANĂ DE SEPARAȚIE

Dacă fluidul a cărui presiune trebuie măsurată conține suspensii solide sau impurități care ar putea înfunda tubul se folosește o membrană de separație (fig. 14.2, *b*). Acest element suplimentar, realizat la IEA sub denumirea MS 100, este de fapt o capsulă manometrică *C*, prevăzută cu membrana elastică *S*. Orificiul O_2 al capsulei este legat cu orificiul O_1 al tubului Bourdon, spațiul comun respectiv fiind umplut cu ulei. Presiunea de măsurare *P* se aplică în acest caz prin orificiul O_3 și, acționînd asupra membranei elastice, se transmite indirect elementului sensibil cu tub Bourdon descris în paragraful precedent (fig. 14.2, *a*); în rest, funcționarea are loc așa cum s-a arătat. Traductorul de presiune cu membrana de separație tip IEA poartă indicativul de fabricație AT 10 ELT 370 MS 100.

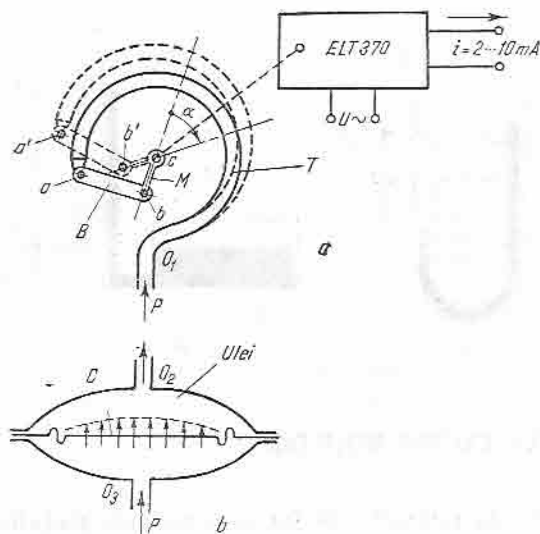


Fig. 14.2. Traductor de presiune cu tub Bourdon:
a — schema de principiu; *b* — membrană de separație.

7. TRADUCTORUL DE PRESIUNE CU CAPSULĂ

Acest traductor cuprinde un element sensibil (indicator IEA tip AT 20), realizat sub forma unei capsule *C* (fig. 14.3) cu pereți din tablă subțire ondulată. Partea posterioară fiind rigidizată prin discul metalic *D*, fluidul introdus la presiunea *P* deformează peretele anterior al capsulei impingind brațul mobil *B*. Brațul respectiv asupra căruia acționează și resortul antagonist *R* se deplasează, transformînd această deplasare într-o rotire α a axului *A*.

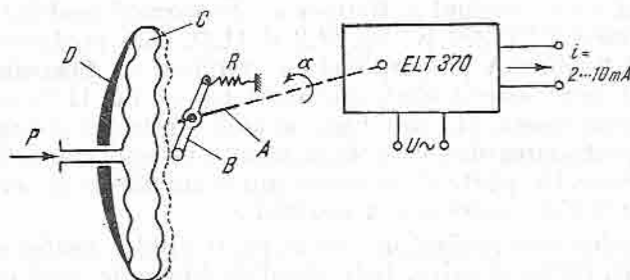


Fig. 14.3. Traductor de presiune cu capsulă.

Acest ax, al cărui unghi de deviație α este proporțional cu presiunea P de măsurare, acționează ca și în cazul precedent asupra modulatorului magnetic din adaptorul ELT 370. Valorificarea semnalului unificat de curent proporțional cu presiunea P se poate face după cum s-a mai arătat.

Traductorul AT 20 ELT 370 este utilizat pentru măsurarea presiunilor mici (0—1 kgf/cm²).

8. TRADUCTORUL DE PRESIUNE DIFERENȚIALĂ CU BURDUFURI

Elementul sensibil al traductorului (indicații AT 30) este format dintr-o capsulă manometrică M (fig. 14.4, *a*), în care prin peretele de separare D se creează două compartimente C_1 și C_2, alimentate cu presiunile de măsurare * P_1 și P_2. Cele două presiuni P_1 și P_2 a căror diferență ΔP trebuie măsurată acționează asupra unor burdufuri elastice B_1 și B_2 rigidizate între ele prin tija T și care, fiind sprijinite pe peretele despărțitor, acționează ca niște resoarte elicoidale. De exemplu, considerîndu-se $P_1 > P_2$, rezultă că B_1 se va comprima, iar B_2 se va întinde. Întrucît cele două burdufuri sînt identice, forța rezultantă ΔF creată de cele două presiuni va fi proporțională cu diferența acestor presiuni:

$$\Delta F = F_1 - F_2 = S(P_1 - P_2) = S\Delta P, \tag{14.1}$$

în care:

S este suprafața burdufurilor;

F_1, F_2 sînt forțele produse de presiunile P_1 respectiv P_2 asupra burdufurilor.

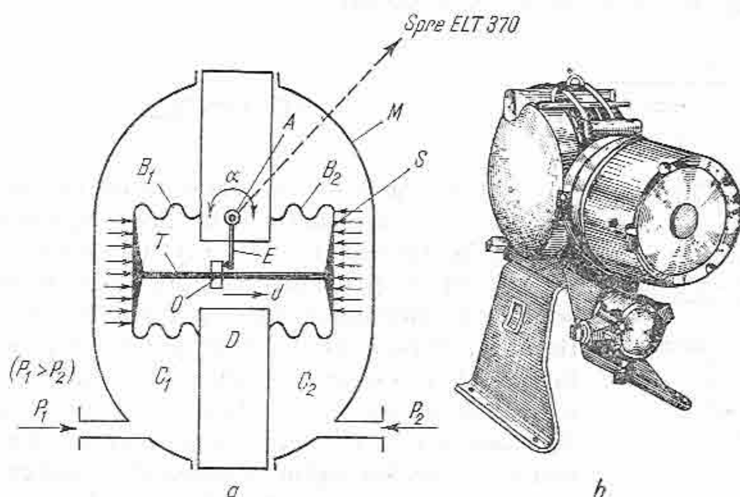


Fig. 14.4. Traductor de presiune diferențială cu burdufuri:
a — schema funcțională; *b* — aspectul exterior al traductorului AT 30 ELT 370.

* Se presupune că se dorește să se măsoare nu valorile absolute ale acestor presiuni, ci diferența $\Delta P = P_1 - P_2$.

În consecință, ținîndu-se seamă de efectul de rezistență la deplasare prezentat de cele două burdufuri, rezultă că la echilibru deplasarea longitudinală a tijei T va fi proporțională cu forța F, deci cu presiunea diferențială ΔP. Tija T prevăzută cu opritorul reglabil * O acționează asupra manivelei E, rotind axul A cu unghiul α. În acest mod se asigură convertirea mărimii neelectrice ΔP într-o deplasare unghiulară α care, cu ajutorul adaptorului ELT 370, se transformă în semnalul unificat $i = 2 \ldots 10$ mA ce poate fi folosit ca și în cazurile precedente.

B. MĂSURAREA DEBITULUI

1. INTRODUCERE

Debitul reprezintă cantitatea de substanță solidă, lichidă sau gazoasă care se scurge în unitatea de timp printr-o anumită secțiune. Debitul se măsoară de obicei sub formă de debit de volum D (m^3/s) sau debit de masă $M = \rho D$ (kg/s), în care ρ(kg/m^3) este densitatea mediului care se scurge.

Notîndu-se cu S (m^2) secțiunea de scurgere a substanței, se poate obține ușor viteza de deplasare v (m/s) a acesteia în secțiunea considerată:

$$v = \frac{D(m^3/s)}{S(m^2)} \quad [m/s]. \tag{14.2}$$

Relația este valabilă și pentru debitul de masă M, cu observația că $D = M/\rho$.

Ca urmare, rezultă că, prin măsurarea debitului D, se obține, la altă scară, valorile pentru viteza de deplasare v.

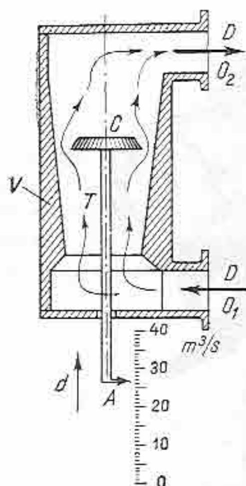


Fig. 14.5. Rotametru.

2. ROTAMETRUL

Rotametrul este un aparat uzual pentru măsurarea locală a debitului unui fluid dintr-o conductă (fig. 14.5). Principial acesta cuprinde un tub conic V plasat vertical și avînd divergența spre în sus, în care se află „în suspensie" un corp C solidar cu o tijă verticală T. Debitul de fluid D pătrunde prin orificiul inferior O_1 și iese prin cel superior O_2, astfel că, pentru a străbate corpul V al rotametrului, este necesar să deplaseze corpul C cu atît mai sus cu cît debitul este mai mare (pentru a-și mări secțiunea de scurgere). Echilibrul forțelor de împingere în sus este asigurat prin greutatea proprie a corpului C și al tijei T, astfel că

* De fapt, o bucșă cu un șurub de presiune care printr-o plasare judicioasă pe tija T asigură că la $\Delta P = 0$ să corespundă $\alpha = 0$.

distanța de ridicare d (proporțională cu D) este pusă în evidență prin acul indicator A ce se deplasează în fața unei scări gradate. Scara gradată poate fi etalonată direct în m^3/s (D) sau în m/s (v).

3. DEBITMETRUL CU TRADUCTOR DE PRESIUNE DIFERENȚIALĂ

Acest aparat este foarte răspîndit la măsurarea debitelor de fluid în conducte (de exemplu, debitul de abur într-o termocentrală). Metoda se bazează pe dependența care există între viteza v de curgere a fluidului și căderea de presiune Δp care ia naștere pe o rezistență hidraulică (pneumatică). Rezistența hidraulică poate fi realizată printr-o strangulație (fig. 14.6, *a*), diafragmă (fig. 14.6, *b*), tub Venturi (ajutaj convergent-divergent — fig. 14.6,*c*) etc.

În toate cazurile, traductorul de presiune diferențială (v. fig. 14.4) se racordează la presiunile P_1 și P_2, obținîndu-se schema principială din figura 14.7. Robinetele r_1, r_2 și r_0 folosesc pentru scoaterea în revizie a traductorului. Viteza v a fluidului în conductă, respectiv debitul D $\left(D = v\frac{\pi d^2}{4}\right)$ pot fi, de exemplu, indicate (înregistrate) cu aparatul de măsurare ELR 35.

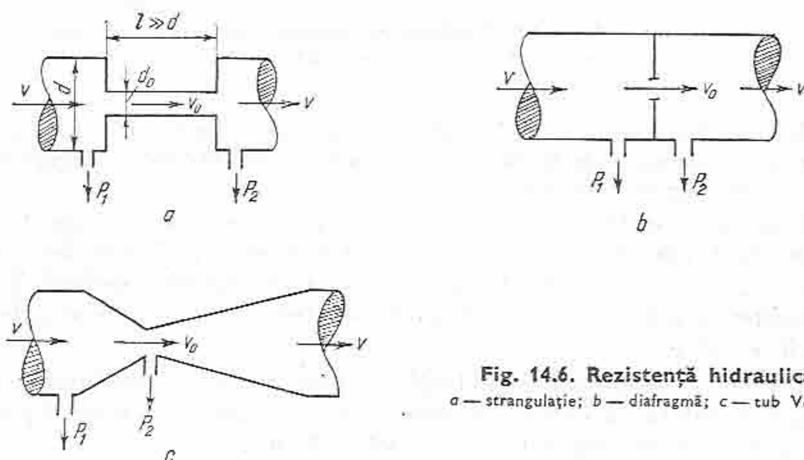


Fig. 14.6. Rezistență hidraulică:
a — strangulație; *b* — diafragmă; *c* — tub Venturi.

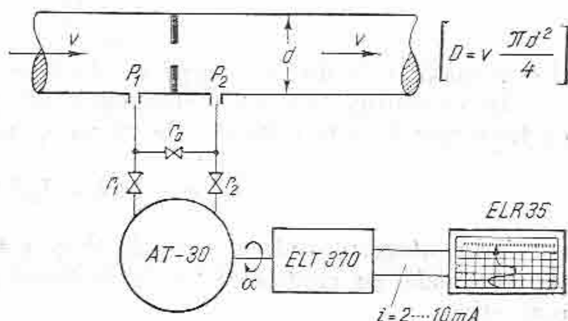


Fig. 14.7. Măsurarea debitului cu traductoare de presiune diferențială.

4. DEBITMETRUL DE INDUCȚIE

Debitmetrul de inducție se folosește la măsurarea debitului unui lichid conductor care circulă printr-o conductă izolată, lichid care de obicei este coroziv (de exemplu, acid) și care deci nu poate veni în contact cu piese meta-

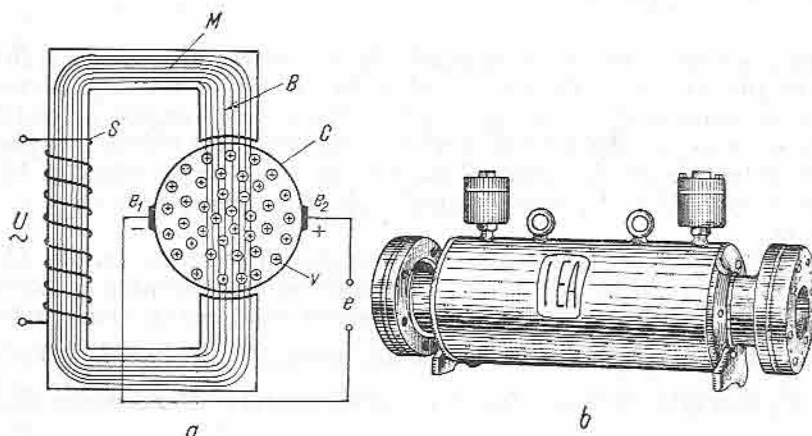


Fig. 14.8. Debitmetru de inducție:
a — schema de funcționare; *b* — aspectul exterior.

lice. Elementul sensibil (fig. 14.8, *a*) cuprinde un cilindru *C* (izolant) prin care circulă moleculele de lichid cu viteza v în sensul indicat pe figură ($\oplus$ = = din exterior spre planul figurii).

Într-o zonă (secțiune) a conductei este plasat un electromagnet *M* cu o înfășurare *S* alimentată de tensiunea alternativă *U*. Cîmpul de inducție magnetică *B* străbate conducta perpendicular și, datorită deplasării lichidului, induce în masa acestuia o tensiune electromotoare e care se culege pe electrozii e_1 și e_2.

Într-adevăr, conform legii inducției electromagnetice, tensiunea electromagnetică e indusă în elementul conductor de lungime l ce se deplasează cu viteza v în cîmpul magnetic de inducție B este:

$$e = Blv \tag{14.3}$$

și este maximă în direcție perpendiculară pe vectorii $\vec{B}$ și $\vec{v}$.

În concluzie, tensiunea electromotoare produsă, de aceeași frecvență cu tensiunea U, este o funcție de viteza v, respectiv de debitul D:

$$e = f_1(v) = f_2(D). \tag{14.4}$$

Prin integrarea într-un anumit timp a tensiunii e se obține o mărime proporțională cu cantitatea totală de lichid scursă prin conductă în timpul respectiv.

Industria românească (IEA) produce un astfel de element sensibil denumit şi „detector electromagnetic de debit" tip FL 281 S, a cărui vedere exterioară este reprezentată în figura 14.8, *b*.

Traductorul realizat în combinaţie cu un adaptor de tipul ELT produce la ieşire semnal unificat (2—10 mA) şi prezintă următoarele avantaje:

— măsurare corectă indiferent de sensul de curgere;

— poate fi montat în orice poziţie (orizontal, vertical sau oblic);

— nu necesită elemente de strangulare a lichidului, deci nu prezintă pierderi de presiune;

— poate fi folosit pentru lichide oricît de viscoase (noroi, şlamuri etc.);

— măsurarea nu este influenţată de temperatura, presiunea, densitatea sau viscozitatea lichidului, ci numai de viteza sa.

5. DEBITMETRUL ELECTRODINAMIC

În carcasa cilindrică C (fig. 14.9) racordată în circuitul unei conducte prin care circulă debitul D al unui fluid (cu viteza V) este plasat un ax A, montat pe lagărele L_1 şi L_2 şi care este rotit de elicea E solidară cu magnetul permanent M. Prin rotirea acestui sistem mobil cu o turaţie $n[n = f_1(D) = f_2(V)]$, magnetul M induce în bobina statorică B o tensiune electromotoare e proporţională cu turaţia n (cu viteza V, respectiv cu debitul D).

Tensiunea e, amplificată în prealabil, este pusă în evidenţă printr-un aparat de măsurare electrică (un voltmetru) etalonat direct în m/s (V) sau m^3/s (D).

Însumîndu-se (contorizîndu-se) impulsurile produse de frecvenţa f a tensiunii U într-un anumit interval de timp Δt, se poate obţine o „mărime numerică" proporţională cu volumul (masa) total de fluid Q (respectiv M) exprimat în m^3 (respectiv kg), trecut prin conductă în timpul considerat Δt.

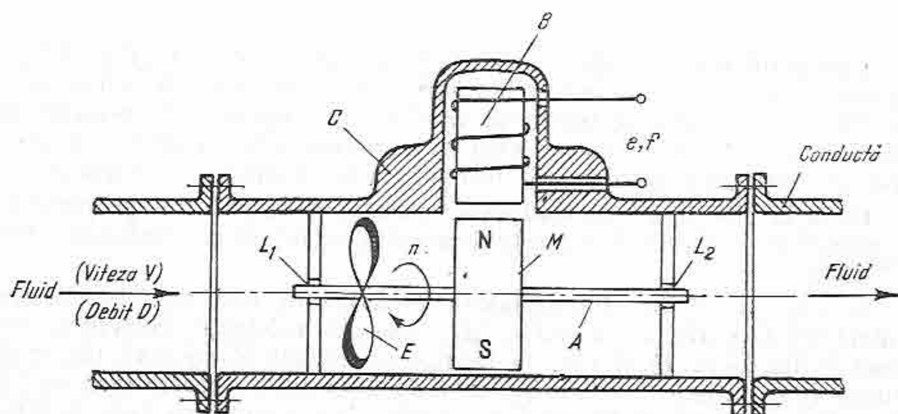


Fig. 14.9. Debitmetru electrodinamic.

C. MĂSURAREA NIVELULUI

1. INTRODUCERE

Măsurarea nivelului este o problemă ce se referă în special la lichide, ca, de exemplu: nivelul apei într-un lac de acumulare, în cazanele de abur sau în degazoare, nivelul combustibilului lichid sau al uleiului de ungere în rezervoare etc. De asemenea, interesează nivelul unor materiale pulverulente, ca, de exemplu, nivelul prafului de cărbune în buncăre etc.

2. NIVELMETRUL CU STICLĂ DE NIVEL

Măsurarea locală a nivelului lichidelor cu recipiente se face cu ajutorul unui sistem simplu, dar eficace, şi anume sticla de nivel prezentată principial în figura 14.10. Sticla de nivel S este un tub transparent care comunică cu rezervorul R, astfel încît nivelul H al lichidului poate fi vizualizat din exterior.

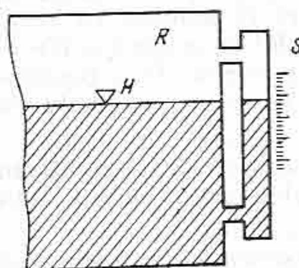


Fig. 14.10. Nivelmetru cu sticlă de nivel.

3. TRADUCTORUL DE NIVEL CU PLUTITOR (inversor)

Elementul sensibil este format dintr-un vas cilindric V (fig. 14.11, *a*), racordat ca şi în cazul precedent la rezervorul al cărui nivel H trebuie măsurat. Plutitorul P aflat în interiorul vasului este suspendat de resortul R şi articulat cu braţul B solidar cu axul A. Variaţiile nivelului H produc deplasarea pe verticală a plutitorului, deci rotirea cu unghiul α a axului A.

Ca şi la alte tipuri de traductoare, variaţia unghiului α, proporţională cu modificarea nivelului H, este transmisă adaptorului deplasare curent ELT 370.

Se observă că variaţia deplasării d (Δd) este mai mică decît aceea a nivelului H (ΔH), adică $\Delta d \ll \Delta H$, datorită existenţei resortului antagonist R (fig. 14.11, *b*). Astfel, pe măsură ce nivelul H coboară ($H_2 < H_1$), resortul R se întinde mărindu-şi forţa de suspensie. Aceasta face ca forţa arhimedică necesară plutitorului să scadă, deci aceasta să iasă mai mult afară din lichid.

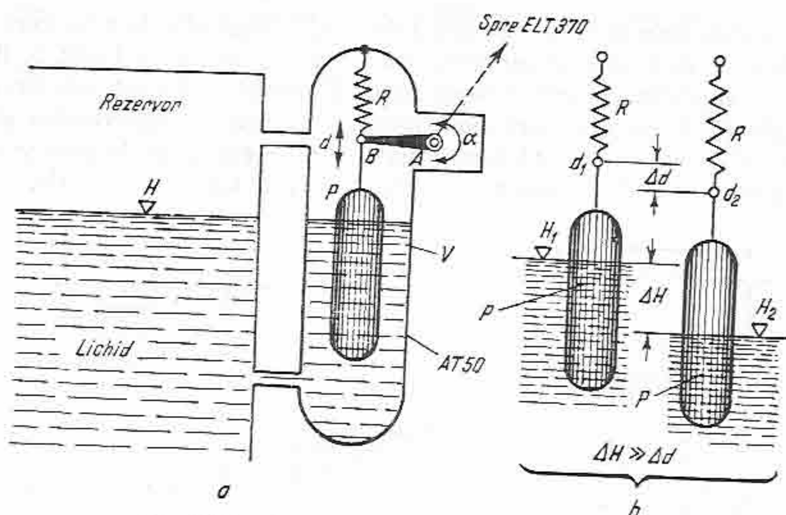


Fig. 14.11. Traductor de nivel cu plutitor:
a — schema elementului sensibil; *b* — poziția inversorului pentru diverse nivele.

4. TRADUCTOARE DE PRESIUNE DIFERENȚIALĂ

Măsurarea pe baza presiunii hidrostatice. Pentru măsurarea nivelului H al lichidului în rezervorul R (fig. 14.12, *a*) se montează un traductor de presiune diferențială al cărui element sensibil se racordează astfel:

— la presiunea P_1 de la fundul rezervorului;

— la presiunea P_2 de la vasul de egalizare V, în care lichidul este menținut la nivelul maxim H_{max} al rezervorului.

Notîndu-se cu:

γ — greutatea specifică a lichidului din vas, în N/m³;

p — presiunea atmosferică *, în N/m²;

L — înălțimea de plasare a rezervorului în raport cu traductorul, în m, se poate scrie:

$$P_1 = (H + L)\gamma + p; \tag{14.5}$$

$$P_2 = (H_{max} + L)\gamma + p. \tag{14.6}$$

Rezultă deci că presiunea diferențială ΔP aplicată traductorului va fi:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = (H_{max} - H)\gamma, \tag{14.7}$$

adică va fi o funcție de nivelul de măsurat H.

Traductorul va elabora deci la ieșire un curent unificat $i = 2 \dots 10$ mA, astfel încît un aparat electric de măsurare ELT va indica (înregistra) nivelul respectiv.

---

* Se presupune că lichidul din rezervor este cu suprafață liberă.

Măsurarea prin insuflare de gaz este o altă variantă de măsurare folosind acelaşi tip de traductor reprezentată schematic în figura 14.12, *b*. Rezervorul R cu suprafaţa liberă al cărui nivel H trebuie măsurat este prevăzut cu o conductă T care coboară pînă aproape de fundul rezervorului şi prin care se insuflă aer (sau azot) comprimat. Aerul comprimat la presiunea P_0 adus prin conducta T se elimină în atmosferă sub forma unor bule.

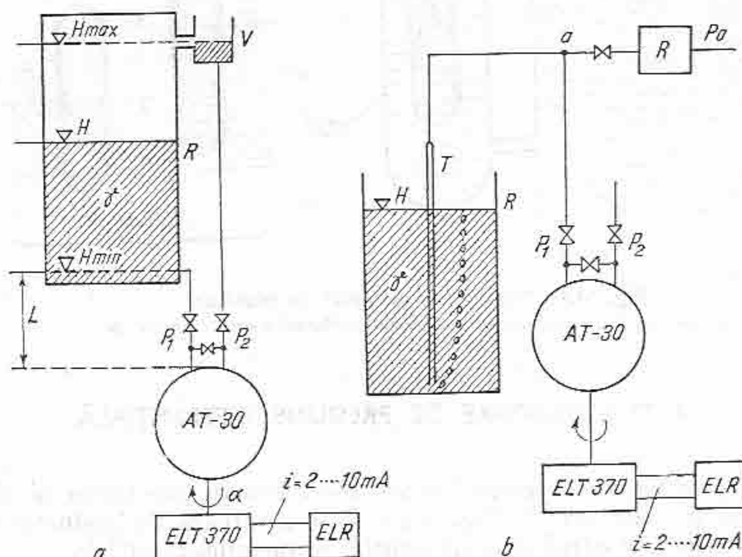


Fig. 14.12. Măsurarea nivelului cu traductoare de presiune diferenţială:

a — pe baza presiunii hidrostatice; *b* — prin insuflare de gaz.

Neglijîndu-se rezistenţa pneumatică a conductei, se poate constata că presiunea în punctul de derivaţie *a* (deci presiunea P_1 aplicată traductorului) depinde de înălţimea H, de greutatea specifică γ a lichidului şi, bineînţeles, de presiunea atmosferică p:

$$P_1 = \gamma H + p. \tag{14.8}$$

Cel de-al doilea racord al elementului sensibil fiind lăsat liber în atmosferă, rezultă:

$$P_2 = p, \tag{14.9}$$

de unde se obţine:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \gamma H.$$

Ca şi în cazul precedent, mărimea elaborată de traductor şi deci măsurată de aparatul electric este o funcţie de nivelul H.

REZUMAT

- *Măsurarea presiunii* se poate face cu:
  - — manometru
    - — cu tub simplu;
    - — cu rezervor;
    - — cu tub Bourdon.
  - — traductor
    - — cu tub Bourdon;
    - — cu membrană de separație.
    - — cu capsulă;
    - — cu burdufuri.
- *Măsurarea debitului* se poate face cu:
  - — rotametru;
  - — traductor de presiune diferențială;
  - — debitmetru de inducție;
  - — debitmetrul electrodinamic.
- *Măsurarea nivelului* se poate face cu:
  - — nivelmetru cu sticlă de nivel;
  - — traductor de nivel
    - — cu plutitor;
    - — de presiune diferențială.

ÎNTREBĂRI RECAPITULATIVE

1. *Care este principiul de funcționare a tubului Bourdon?*
2. *Se poate folosi un traductor de presiune cu burdufuri pentru măsurarea unei singure presiuni?*
3. *Ce avantaje substanțiale prezintă debitmetrul de inducție?*
4. *Debitmetrele pot fi folosite și ca traductoare de viteză, și cum?*
5. *Care sînt avantajele și dezavantajele traductorului de nivel cu plutitor față de cel de presiune?*

C A P I T O L U L 15

MĂSURAREA COMPOZIȚIEI LICHIDELOR ȘI A GAZELOR

A. MĂSURAREA CONCENTRAȚIEI ELECTROLIȚILOR

În acest scop se folosesc traductoarele electrolitice care permit măsurarea concentrației pe baza măsurării conductivității (rezistivității) electrice a acestora.

Elementul sensibil al unui traductor electrolitic este realizat sub forma unui condensator plan-paralel (fig. 15.1) care cuprinde două armături E_1 și E_2 printre care trece soluția de analizat. Se observă că acest element, numit și *celulă electrolitică*, constituie de fapt un rezistor lichid de formă paralelipipedică, avînd lungimea l_0 și secțiunea s_0. Rezistența electrică R_X a acestei celule se calculează cu relația cunoscută:

$$R_X = \frac{1}{\sigma_X} \cdot \frac{l_0}{s_0}, \tag{15.1}$$

în care σ_X reprezintă conductivitatea electrică a soluției.

Din relația (15.1) rezultă:

$$\sigma_X = \frac{l_0}{R_X s_0} \tag{15.2}$$

și, deoarece σ_X depinde de concentrația c de săruri în soluție $[\sigma_X = f_1(c)]$, relația (15.1) devine:

$$R_X = \frac{l_0}{s_0} \cdot \frac{1}{f_1(c)} = f_2(c). \tag{15.3}$$

Relația de dependență $\sigma = f(c)$ este reprezentată grafic în figura 15.2 pentru o serie de substanțe chimice, concentrația fiind indicată în grame pe litru de soluție.

În țara noastră se fabrică la IEA-București o serie de traductoare electrolitice de concentrație, numite și *traductoare electroconductometrice*. De exemplu, în figura 15.3 este prezentat tipul W16 ELT 730, al cărui element sensibil este realizat sub forma unui corp de ventil cu flanșe pentru a putea fi racordat în circuitul unei conducte. În interior se află celula de măsurare formată din electrozi de platină (înseriată cu rezistența de balast r) constituind rezistența R_X, precum și rezistența de compensare R_c. Rezistența R_c, de fapt o termorezistență, constituie, împreună cu rezistențele R_1, R_2 și R_3, o punte Wheatstone, în a cărei diagonală de măsurare ($A-B$) se află rezis-

tența de măsurat R_X (înseriată cu r). În diagonala CD, puntea este alimentată cu o tensiune constantă $U_0 = 1$ V, la o frecvență de 4 kHz. Tensiunea U_X care ia naștere la bornele rezistenței R_X se determină din relația:

$$U_X = \frac{U_{AB}}{r + R_X} R_X. \tag{15.4}$$

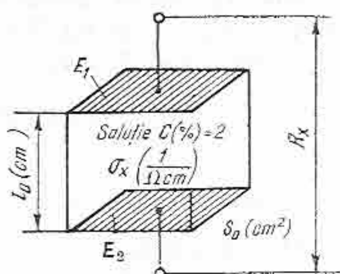


Fig. 15.1. Celulă electrolitică.

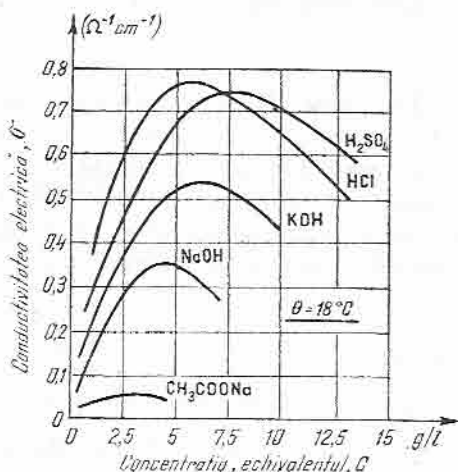


Fig. 15.2. Variația conductivității în funcție de concentrația electrolitului $\sigma = f(c)$.

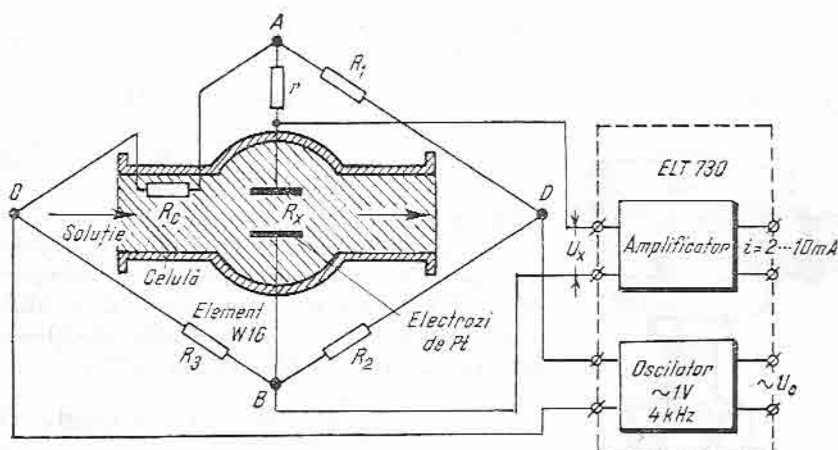


Fig. 15.3. Traductor electroconductometric.

La o temperatură dată, termorezistența R_c are o valoare constantă, puntea prezintă un anumit grad de dezechilibru și, deoarece tensiunea U_0 este constantă, rezultă că și U_{AB} este constantă, fiind dată de relația:

$$U_{AB} = U_0 \frac{R_2 R_c - R_1 R_3}{(R_1 + R_c)(R_2 + R_3)}. \tag{15.5}$$

Așadar, ceilalți termeni care intervin în relația (15.4) fiind constanți, rezultă că, la temperatură constantă, tensiunea U_X depinde numai de valoarea R_X:

$$U_X = f_3(R_X). \tag{15.6}$$

Ținîndu-se seamă de relațiile (15.3) și (15.6), rezultă în final:

$$U_X = f_4(c). \tag{15.7}$$

Tensiunea U_X obținută este amplificată și transformată într-un semnal unificat $i = 2...10$ mA proporțional cu concentrația de măsurare.

În cazul în care concentrația c a soluției rămîne neschimbată (ceea ce înseamnă că mărimea elaborată de traductor trebuie să rămînă aceeași), însă se modifică temperatura θ a soluției, conductivitatea σ_X se modifică în sensul că crește cu temperatura la o valoare σ'_X după o lege liniară:

$$\sigma'_X = \sigma_X(1 + \gamma\Delta\theta), \tag{15.8}$$

în care:

$\Delta\theta$ este variația de temperatură față de starea anterioară, în grd;

γ — coeficientul de variație al conductivității, în 1/grd.

În consecință, în cazul creșterii temperaturii, rezistența R_X scade la o valoare R'_X (conform relației 15.1):

$$R'_X = \frac{1}{\sigma_X(1 + \gamma\Delta\theta)} \frac{l_0}{s_0}, \tag{15.9}$$

ceea ce ar avea ca efect o scădere a tensiunii U_X la o valoare U'_X:

$$U'_X = \frac{U_{AB}}{r + R'_X} R'_X, \tag{15.10}$$

adică ar apărea o eroare de măsurare.

În această situație intervine însă rezistența de compensare R_c care, crescînd cu temperatura ($R'_c > R_c$), produce o creștere a dezechilibrului punții ($U'_{AB} > U_{AB}$) — v. relația (15.5) — astfel încît în realitate relația (15.4) devine:

$$U'_X = \frac{U'_{AB}}{r + R'_X} R'_X = U_X = \text{const.} \tag{15.11}$$

adică tensiunea U_X rămîne neschimbată, chiar dacă temperatura a variat, însă concentrația nu s-a modificat.

O altă variantă de element sensibil fabricat la IEA este detectorul electroconductometric tip W 44 realizat sub forma unei sonde (fig. 15.4), care poate fi introdus printr-un orificiu într-o conductă sau într-un rezervor.

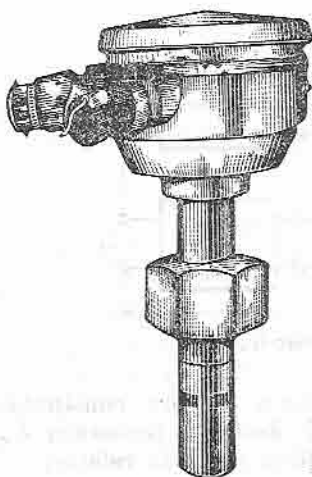


Fig. 15.4. Element sensibil electroconductometric tip sondă (W44).

B. MĂSURAREA *p*H-ului

Pentru măsurarea gradului de aciditate sau alcalinitate (pH-ul) al soluţiilor se folosesc metode electroconductometrice bazate pe faptul că între un metal cufundat într-o soluţie care conţine ionii metalului şi soluţia respectivă apare o diferenţă de potenţial E. Tensiunea electrică E depinde de concentraţia activă c a ionilor de metal şi de temperatura absolută T(K) după legea lui Nernst:

$$E = \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \log c + E_0, \qquad (15.12)$$

în care:

R este constanta gazelor ($R = 8{,}316$ J);
F — numărul lui Faraday ($F = 96{,}5$ C);
n — valenţa metalului;
E_0 — potenţialul normal de electrod specific metalului respectiv.

Relaţia (15.12) este valabilă şi pentru hidrogen, care poate înlocui metalul.

O aplicaţie practică a acestei relaţii o constituie determinarea concentraţiei active c a ionilor de hidrogen din soluţie.

De exemplu, apa pură se disociază în ioni de hidrogen (H) şi oxhidril (OH):



$$H_2O \rightleftarrows H^+ + OH^-. \qquad (15.13)$$

Concentraţiile ionilor de H^+ şi OH^- sînt egale pentru apa pură şi la temperatura de +25 °C au valoarea:

$$C_H^+ = C_{OH}^- = 10^{-7}\ \text{kmol/m}^3, \qquad (15.14)$$

produsul acestor concentraţii fiind constant şi constituind „produsul ionic al apei":

$$C_H^+ \cdot C_{OH}^- = 10^{-14}\ \text{kmol/m}^3. \qquad (15.15)$$

În evaluarea gradului de aciditate sau alcalinitate al unei soluţii se defineşte pH-ul acesteia ca logaritmul zecimal al concentraţiei ionilor de hidrogen luat cu semnul minus:

$$pH = -\log C_H^+. \qquad (15.16)$$

În mod asemănător se poate defini şi un indicator similar pentru numărul de ioni de oxhidril:

$$pOH = -\log C_{OH}^-. \qquad (15.17)$$

Conform relaţiei (15.14) rezultă că, pentru apa pură (neutră), cei doi indicatori sînt egali:

$$pH = pOH = 7. \qquad (15.18)$$

Din relaţia (15.15) se constată că, produsul ionic al apei fiind constant, rezultă:

$$pH + pOH = -(\log C_H^+ + \log C_{OH}^-) = 14. \qquad (15.19)$$

În practică se foloseşte însă numai unul dintre indicatori, şi anume pH-ul, celălalt (pOH) rezultînd uşor prin diferenţa la 14.

Prin adăugarea unui acid în apă, concentraţia ionilor de hidrogen creşte, deci pH-ul creşte:

$$\text{SOLUŢIE ACIDĂ} \Rightarrow 7 < pH < 14,$$

limita superioară (14) corespunzînd unui acid pur (100%).

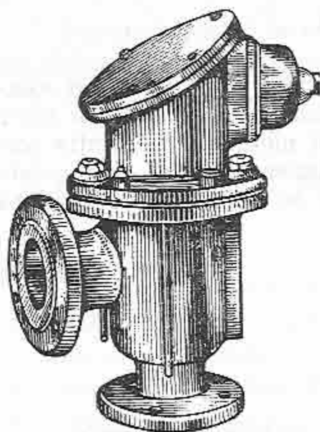


Fig. 15.5. Element sensibil de pH (W 63).

De asemenea, prin adăugarea unei baze (soluție alcalină), concentrația ionilor de hidrogen scade, deci:

$$\text{SOLUȚIE BAZICĂ} \Rightarrow 0 < p\text{H} < 7,$$

limita inferioară (0) corespunzînd unei baze pure (100%).

Determinarea pH-ului se face cu ajutorul unui element sensibil care cuprinde doi electrozi introduși într-un vas ce conține lichidul de analizat.

Așa cum a rezultat din relația (15.12), între cei doi electrozi va apărea o tensiune electromotoare E care va depinde de log c, deci de pH-ul soluției. Dintre cei doi electrozi, unul este „de referință", iar altul „de măsurare". Potențialul de măsurare se modifică numai la electrodul numit *de măsurare*, realizat de obicei din hidrogen, stibiu sau sticlă, în timp ce electrodul de referință, realizat din clorură mercuroasă (calomel) sau din clorură de argint, este neutru, adică nu-și modifică potențialul de măsurare în funcție de concentrația de ioni de hidrogen. În țara noastră se fabrică traductoare pH-metrice (IEA), ca, de exemplu, tipurile care folosesc elementele sensibile W 62 și W 63. Tipul W 62 se folosește pentru măsurări discontinue prin imersia (cufundarea) elementului sensibil într-un vas cu soluția de măsurare. Tipul W 63 al cărui aspect exterior este reprezentat în figura 15.5 este prevăzut cu două flanșe care permit racordarea acestuia în circuitul unei conducte și măsurarea în flux continuu a pH-ului. Caracteristicile statice ale traductoarelor (elemente sensibile) W 62 și W 63 sînt prezentate în figura 15.6. Adaptorul ELT 630 (fig. 15.7) constituie, împreună cu elementele sensibile arătate, cele două tipuri de traductoare pH-metrice folosite în țara noastră.

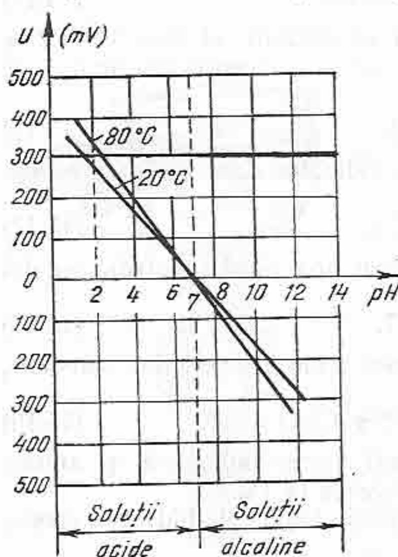


Fig. 15.6. Caracteristicile statice ale traductoarelor pH-metrice.

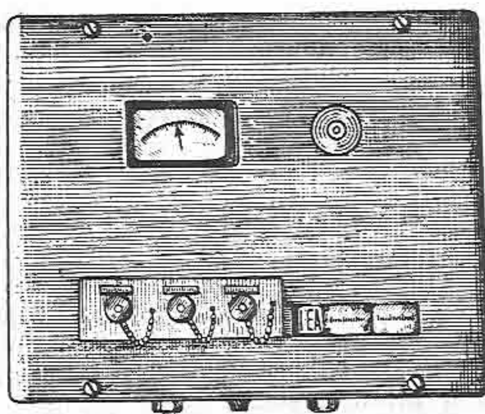


Fig. 15.7. Adaptor pentru traductorul pH-metric.

C. MĂSURAREA (analiza) COMPOZIŢIEI GAZELOR

În procesele de ardere a combustibililor, un indice de calitate a arderii care reflectă randamentul procesului respectiv poate fi obţinut prin analiza gazelor rezultate din ardere.

În practică sînt folosite trei metode de analiză a gazelor, şi anume metodele: electrice, magnetice şi termice.

Metodele electrice se bazează pe măsurarea rezistenţei (rezistivităţii) ohmice, respectiv a conductivităţii electrice sau a permitivităţii dielectrice a unor volume din gazele de studiat.

Metoda magnetică. La metoda magnetică se foloseşte *susceptibilitatea magnetică* $\varkappa$ a componentelor gazului de analizat.

Se precizează că susceptibilitatea magnetică $\varkappa$ a unei substanţe este dată de relaţia:

$$\varkappa = \mu_r - 1, \qquad (15.20)$$

în care μ_r este permeabilitatea magnetică relativă.

La corpurile *paramagnetice*, $\mu_r > 1$, deci $\varkappa > 0$, iar la cele *diamagnetice*, $\mu_r < 1$, deci $\varkappa < 0$. De exemplu, pentru oxigen (paramagnetic) $\varkappa = +1{,}78$, iar pentru bioxid de carbon (diamagnetic), $\varkappa = -0{,}011$.

Datorită susceptibilităţii magnetice mari a oxigenului, traductoarele de acest tip sînt folosite în special pentru analiza conţinutului de oxigen în gaze.

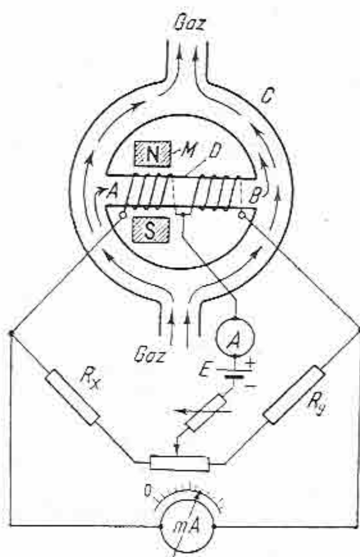


Fig. 15.8. Traductor magnetic de compoziţie a gazelor.

Un astfel de traductor este reprezentat schematic în figura 15.8. Gazul de măsurat este trecut în sensul indicat de săgeţi printr-o cameră inelară C prevăzută cu o legătură diagonală D (un tub de sticlă cu pereţi subţiri). Pe acest tub se află înfăşurat un bobinaj de încălzire format din două secţiuni A şi B, cu o priză mediană. Cele două secţiuni ale bobinajului împreună cu rezistoarele R_x şi R_y constituie o punte Wheatstone, avînd într-o diagonală o sursă de alimentare E (reglabilă), iar în cealaltă diagonală — un miliampermetru mA. Peste secţiunea A a bobinajului se află magnetul permanent M care produce un cîmp magnetic la capătul din stînga al tubului de sticlă.

Un gaz de măsurat care conţine numai componenţi diamagnetici, trecînd prin camera inelară, nu străbate legătura transversală *. Puntea echilibrată la zero nu este influenţată, deci indicaţia miliampermetrului este zero. Dacă însă gazul de măsurat conţine molecule de O_2, acestea fiind paramagnetice se vor magnetiza, fiind atrase în tubul de sticlă de către magnetul

* Se observă că, din considerente de simetrie, presiunile aerodinamice la extremităţile tubului de sticlă sînt egale, deci nu există deplasare de gaz în diagonala respectivă.

permanent M. Prin încălzirea lor de către bobinajul A, susceptibilitatea lor magnetică scade (practic la zero) și ele sînt împinse spre dreapta de alte molecule reci de O_2 care sînt atrase în număr mai mare. Se creează astfel un curent de gaz care se deplasează de la stînga spre dreapta și a cărui viteză (debit) este proporțională cu conținutul de O_2 în gaz. Această circulație a gazului va avea ca efect, față de starea de echilibru anterioară, o răcire

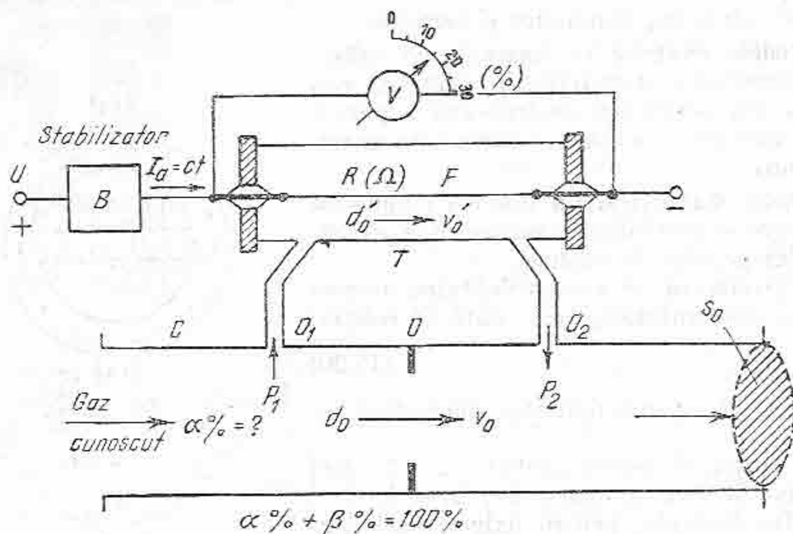


Fig. 15.9. Traductor termic de compoziție a gazelor.

a bobinajului A și o încălzire suplimentară a bobinajului B. Ca urmare, rezistivitatea bobinajelor se modifică, puntea se dezechilibrează și indicația miliampermetrului mA va fi, practic, proporțională cu viteza (debitul) gazului care traversează tubul de sticlă, deci cu conținutul de oxigen în gazul analizat.

Metoda termică. Un exemplu de măsurare a compoziției gazelor pe cale termică este reprezentat în figura 15.9. Elementul sensibil este realizat sub forma unui tub închis T cu diametrul de 5—7 mm și lungimea de 70—80 mm, în care este introdus un fir termorezistent F foarte subțire ($\varnothing = 0,02 ... 0,05$ mm).

Termorezistența F este încălzită cu un curent electric continuu de la o sursă de tensiune U, curent menținut la o valoare constantă I_0 cu ajutorul unui stabilizator (baretor) B.

Prin tubul respectiv circulă cu o viteză relativ mică amestecul de gaze cunoscute, însă a căror proporție trebuie măsurată. Considerîndu-se că, practic, gazul de analizat nu se mișcă prin tub, deci nu există o răcire a termorezistenței prin convecție, rezultă că singura cale de disipare a căldurii produse în firul F este *conducția* prin gazul de măsurat. Conductivitatea termică a amestecului variază cu temperatura în conformitate cu relația:

$$\lambda_a = \lambda_0 \, [1 + A(\theta_a - \theta_0)], \tag{15.21}$$

în care:

λ_a este conductivitatea amestecului la temperatura θ_a;

λ_0 — idem, la temperatura θ_0;

A — coeficient de temperatură al conductivității.

Dacă se analizează un amestec de două gaze cunoscute, avînd deci conductivitățile λ_{a1} și λ_{a2} cunoscute, amestecat însă în proporții necunoscute $\alpha\%$ și $\beta\%$ (evident $\alpha\% + \beta\% = 100\%$), conductivitatea medie a amestecului va fi:

$$\lambda_{a12} = \frac{\alpha\lambda_{a1} + \beta\lambda_{a2}}{\alpha + \beta}. \tag{15.22}$$

Deoarece:

$$\alpha + \beta = 100,$$

rezultă:

$$\lambda_{a12} = \frac{\alpha\lambda_{a1} + (100 - \alpha)\lambda_{a2}}{100}. \tag{15.23}$$

Pe de altă parte, termorezistența F fiind alimentată cu curent constant I_0, temperatura acesteia va depinde de valoarea conductivității termice λ_{a12}. Într-adevăr, dacă conductivitatea termică a mediului este mai mare, disiparea căldurii se face mai ușor, temperatura termorezistenței va fi mai mică, deci valoarea rezistenței acesteia $R(\Omega)$ va fi mai mică, și invers.

Măsurîndu-se deci valoarea rezistenței R printr-o metodă cunoscută [de exemplu, măsurîndu-se căderea de tensiune U_G produsă de curentul I_0 pe rezistența R cu ajutorul voltmetrului V (fig. 15.9) $U_G = RI_0$], se determină implicit conductivitatea termică a amestecului:

$$R = \frac{U_G}{I_0} = f_1(\lambda_{a12}). \tag{15.24}$$

Această relație de dependență se determină prin calcule conform legii transmisiei căldurii — legea Fourier — pentru traductorul respectiv și se verifică experimental.

Din relațiile (15.23) și (15.24) rezultă:

$$R = f_2(\alpha), \tag{15.25}$$

sau, ținîndu-se seamă de proporționalitate între R și U_G, se obține în final:

$$U_G = f_3(\alpha). \tag{15.26}$$

Practic, măsurarea se efectuează în felul următor:

Prin conducta C (fig. 15.9) circulă un gaz cunoscut ca compoziție (de exemplu, CO și CO_2), însă de proporție α (%) necunoscută. Datorită diafragmei D plasată în conductă se creează o diferență de presiune $P_1 - P_2$ care face ca o mică parte d_0' din debitul d_0 să treacă prin traductor cu o viteză mică v_0'. În funcționare normală, voltmetrul V etalonat în procente va indica — conform relației (15.26) — direct valoarea α (%).

D. MĂSURAREA UMIDITĂŢII GAZELOR

Măsurarea umidităţii gazelor se reduce de fapt la măsurarea diferenţei de temperatură dintre două termorezistenţe aferente unor celule sensibile T_{um} şi T_{us} (fig. 15.10), una (T_{um}) fiind alimentată cu gazul umed a cărui umiditate $u(\%)$ trebuie măsurată, iar cealaltă (T_{us}) cu acelaşi gaz, însă uscat în prealabil.

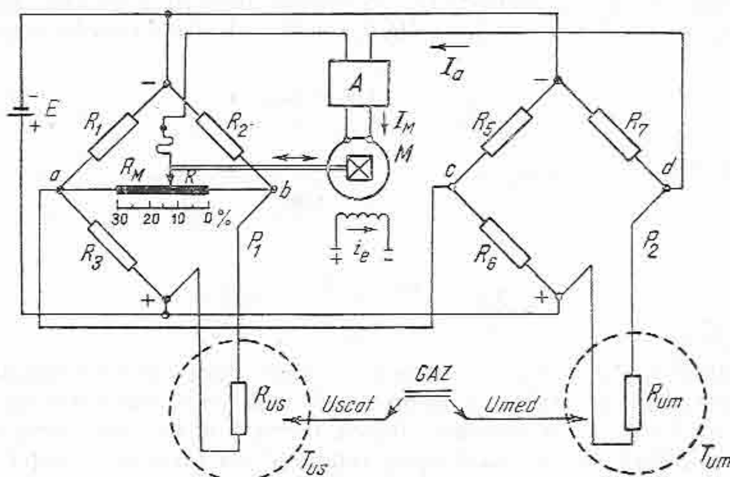


Fig. 15.10. Traductor de măsurare a umidităţii gazelor (psihrometru).

Umiditatea relativă u a gazului se determină pe baza relaţiei:

$$u = \frac{P_{um} - K(\theta_{us} - \theta_{um})}{P_{us}} \cdot \frac{P}{760}, \tag{15.27}$$

în care:

$P_{um}(P_{us})$ este presiunea vaporilor saturaţi din gazul de încercat la temperatura θ_{um} (respectiv θ_{us}) a celulei de măsurare T_{um} (respectiv T_{us});

P — presiunea barometrică (exterioară);

K — constanta psihrometrică.

Traductorul psihrometric cuprinde cele două celule (termometre) T_{us} şi T_{um} avînd rezistenţele *(termorezistenţe) R_{us} şi R_{um} şi constituind împreună cu rezistoarele R_1, R_2, R_3, respectiv R_5, R_6, R_7, braţele a două punţi Wheatstone, P_1 şi P_2. Ambele punţi sînt alimentate de la aceeaşi sursă de tensiune continuă E. Rezistenţa R_M din diagonala punţii P_1 reprezintă reostatul unui potenţiometru automat acţionat de motorul M. Acest motor (de curent continuu cu excitaţie separată) acţionează pe baza curentului I_0 de dezechilibru dintre cele două punţi, curent care este în prealabil amplificat de ampli-

* Celulele cu termorezistenţe sînt similare cu tubul cu termorezistenţa din paragraful precedent (fig. 15.9).

ficatorul A. Motorul M deplasează cursorul K aferent reostatului R_M şi nu se opreşte decît atunci cînd I_0 se anulează.

Tensiunea U_{ab} din diagonala punţii P_1 este o funcţie de valoarea R_{us} a termorezistenţei celulei T_{us}:

$$U_{ab} = E \frac{R_1 R_{us} - R_2 R_3}{(R_1 + R_3)(R_2 + R_{us})}, \qquad (15.28)$$

iar la rîndul său R_{us} depinde de temperatura θ_{us} (ca şi în cazul fig. 15.9):

$$R_{us} = f_1(\theta_{us}). \qquad (15.29)$$

Din relaţiile (15.28) şi (15.29) se obţine:

$$U_{ab} = f_2(\theta_{us}). \qquad (15.30)$$

În mod asemănător, pentru puntea P_2 rezultă:

$$U_{cd} = f_3(\theta_{um}). \qquad (15.31)$$

Se constată că ambele punţi funcţionează în regim dezechilibrat.

Curentul de dezechilibru I_0 care alimentează amplificatorul A, deci motorul M, este o funcţie de gradul de dezechilibru al celor două punţi, adică:

$$I_0 = \frac{U_{aK} - U_{cd}}{R_A}, \qquad (15.32)$$

în care:

U_{aK} reprezintă un procent din tensiunea U_{ab} dată de raportul rezistenţelor determinate de cursorul K;

R_A — rezistenţa de intrare a amplificatorului A.

Se observă că, practic, se poate considera:

$$\frac{U_{aK}}{U_{ab}} = \frac{R_{aK}}{R_{ab}} = \frac{R_{aK}}{R_M} \qquad (15.33)$$

(s-a notat cu R_{aK} valoarea rezistenţei între punctele a şi K).

Modul de măsurare va fi deci următorul:

— cînd umiditatea gazului este zero ($u\% = 0$), deci gazul de măsurat este perfect uscat, rezultă:

$$R_{um} = R_{us} \Rightarrow U_{cd} = U_{ab}, \qquad (15.34)$$

Pentru a avea $I_0 = 0$ [relaţia (15.32)] este necesar ca:

$$U_{aK} = U_{cd} = U_{ab}, \qquad (15.35)$$

adică cursorul K este deplasat de motorul M pînă la capătul b (K coincide cu b), indicînd pe scara gradată $u = 0\%$, caz în care motorul se opreşte;

— cînd umiditatea gazului creşte ($u\% \neq 0$), rezistenţa R_{um} se modifică şi curentul de diferenţă I_0 care apare acţionează motorul, deci cursorul K, pînă cînd sistemul se echilibrează ($I_0 = 0$), indicînd pe scara gradată valoarea umidităţii respective.

REZUMAT

- Măsurarea concentrațiilor electroliților se bazează pe măsurarea conductivității electrice a acestora.
- Măsurarea *p*H-ului se bazează pe diferența de potențial care apare între un metal cufundat într-o soluție și soluția respectivă.
- Analiza compoziției gazelor se poate face pe baza următoarelor metode: electrice, magnetice și termice.
- Măsurarea umidității gazelor se poate face măsurîndu-se temperatura a două termorezistențe: una plasată în gazul umed, iar cealaltă în același gaz complet uscat.

ÎNTREBĂRI RECAPITULATIVE

1. *Cum funcționează traductoarele electrolitice de concentrație (de exemplu, tipul românesc IEA-W-16-ELT 730)?*
2. *Care este structura unui pH-metru și ce reprezintă indicațiile de pe scara sa?*
3. *Poate fi folosit un termistor în locul termorezistenței conductoare la analizorul de compoziție folosind metoda termică?*
4. *Se poate măsura umiditatea unui gaz necunoscut ca compoziție?*

CERINȚELE FUNCȚIONĂRII NORMALE A INSTALAȚIILOR DE PRODUCERE, TRANSPORT ȘI DISTRIBUȚIE A ENERGIEI ELECTRICE

Pentru a se asigura funcționarea continuă, normală, a acestor instalații se stabilesc condițiile tehnice încă din faza de concepție, condiții care impun anumite dimensiuni, folosirea unor materiale speciale, conductoare și izolanți, rezistențe mecanice mari etc.

În cele ce urmează se vor descrie unele prevederi principale ale regulamentelor, normelor și instrucțiunilor de exploatare a instalațiilor sus-arătate.

A. GENERATOARE ȘI COMPENSATOARE SINCRONE

Puterea nominală a generatoarelor și a compensatoarelor sincrone, pentru factorul de putere nominal, trebuie să se păstreze în cazul variației tensiunii cu $\pm 5\%$.

La o tensiune a generatoarelor sau a compensatoarelor sincrone mai mică decît 95% din tensiunea nominală, curentul din stator trebuie să nu depășească 105% din curentul nominal.

Tensiunea de regim maximă, pentru toate generatoarele și compensatoarele sincrone, trebuie să nu depășească 110%.

Curenții maximi admisibili ai înfășurărilor statorului și rotorului generatoarelor și compensatoarelor sincrone, în cazul respectării parametrilor nominali ai mediului de răcire, se stabilesc pe bază de încercări termice sau pe baza datelor nominale indicate de întreprinderea constructoare.

Nu se admite depășirea îndelungată a puterii aparente disponibile a generatoarelor și a compensatoarelor sincrone.

În timpul unui incident în sistemul energetic din care fac parte generatoarele se admite o suprasarcină de scurtă durată a acestora față de curentul nominal al statorului și al rotorului. Pentru fiecare tip de mașină în parte se stabilesc suprasarcinile admisibile de scurtă durată, cu avizul întreprinderii constructoare.

Funcționarea generatoarelor și a compensatoarelor sincrone în rețele cu neutrul izolat în cazul punerii la pămînt a unei faze în rețeaua alimentată la tensiunea generatoare este permisă timp de cel mult două ore.

Funcționarea generatoarelor și a compensatoarelor sincrone în regim dezechilibrat este, în general, admisă.

Se stabilesc, în acest sens, valorile curenţilor statorici de secvenţă inversă I_2 datoraţi sarcinilor nesimetrice. Aceste valori sînt date în procente din curentul nominal (de secvenţă directă) prin date de catalog sau caiete de sarcini ale întreprinderilor constructoare. De exemplu, $I_2 = 8\% I_n$ la turbogeneratoare şi $I_2 = 12\% \ I_n$ la hidrogeneratoare.

Prin grad de dezechilibrare a curenţilor se înţelege diferenţa dintre curentul maxim şi minim de pe faze, exprimată în procente din curentul nominal al generatorului. Gradul de dezechilibrare maxim admis se determină experimental, pentru fiecare grup generator sau compensator în parte. În lipsa acestor determinări se admit următoarele valori maxime:

— 10% din curentul nominal al statorului, pentru turbogeneratoare şi generatoare diesel;

— 20% pentru hidrogeneratoare şi compensatoare sincrone.

În nici o fază însă, curentul nu trebuie să depăşească valoarea nominală.

Turbogeneratoarele pot funcţiona în regim asincron neexcitate timp de 30 min; fac excepţie generatoarele cu bandaje de sîrmă în rotor sau cu dinţi demontabili în fierul rotorului. Sarcina admisibilă în regim asincron se determină prin încercări.

Funcţionarea generatoarelor în regimurile de motor sau compensator sincron este admisă pe orice durată de timp. La funcţionarea în regim de compensator sincron, puterea aparentă a generatorului se reduce conform instrucţiunilor întreprinderii constructoare.

Rezistenţa de izolaţie a întregului circuit de excitaţie a generatoarelor şi a compensatoarelor sincrone, măsurată cu un megohmmetru de 500—1 000V, trebuie să fie de cel puţin 0,5 MΩ.

Punerea în funcţiune a generatoarelor şi a compensatoarelor sincrone care au rezistenţa de izolaţie a circuitului de excitaţie mai mică decît 0,5 MΩ este permisă numai în cazuri speciale.

Această rezistenţă se măsoară periodic, în timpul funcţionării generatorului. Rezultatele acestor măsurări se notează şi servesc la stabilirea periodicităţii curăţirii sistemului de excitaţie al generatorului.

B. MOTOARE ELECTRICE DIN CENTRALE ŞI STAŢII ELECTRICE

Pentru controlul prezenţei tensiunii pe tablourile de distribuţie din secţii, care alimentează grupe de motoare sau motoare importante, se montează voltmetre sau lămpi de supraveghere.

Pentru supravegherea operaţiilor de pornire şi pentru controlul funcţionării motoarelor electrice cu puteri de 40 kW sau mai mult, precum şi a motoarelor electrice care antrenează mecanisme la care diversele faze ale procesului tehnologic provoacă variaţia curentului absorbit de motor, la locul de supraveghere a motorului se montează un ampermetru care măsoară curentul în circuitul statoric al motorului electric.

Exploatarea motoarelor electrice în centrale se face de către personalul secţiei care deserveşte mecanismele antrenate de motoarele respective. Acest personal efectuează în general următoarele operaţii:

— pornirea, reglarea vitezei şi oprirea motorului;
— controlul sarcinii;
— controlul temperaturii lagărelor;
— controlul nivelului uleiului în lagăre;
— controlul temperaturii aerului la intrare şi ieşire, la motoarele cu răcire în circuit închis;
— controlul temperaturii bobinajelor, la motoarele prevăzute cu termorezistenţe;
— supravegherea permanentă a funcţionării motoarelor.

Motoarele electrice trebuie să suporte în bune condiţii regimul permanent de funcţionare la sarcina nominală în cazul în care tensiunea variază între —5 şi —10% faţă de tensiunea nominală.

Vibraţiile motoarelor electrice, în timpul funcţionării, trebuie să nu depăşească 0,06 mm, pentru motoarele electrice cu viteza de 3 000 rot/min, şi 0,10 mm, pentru motoarele electrice cu viteza de 1 500 rot/min sau mai mică.

Neuniformitatea întrefierului, între stator şi rotor, trebuie să nu depăşească 10%.

C. TRANSFORMATOARE

La exploatarea transformatoarelor trebuie să fie asigurate condiţii comode şi nepericuloase, pentru controlul nivelului în conservator şi în izolatoarele de trecere, pentru controlul temperaturii uleiului şi al releului de gaze, precum şi pentru luarea probelor de ulei.

Transformatoarele de puteri mai mari se prevăd cu termometre pentru măsurarea temperaturii uleiului.

Punerea sub tensiune a transformatoarelor, montate bloc cu generatoarele (după montaj sau ieşite dintr-o reparaţie capitală cu ocazia căreia s-au schimbat înfăşurările), se face prin ridicarea treptată a tensiunii, pornindu-se de la zero la 110% din valoarea nominală, pe plotul corespunzător tensiunii celei mai ridicate, după care se fac trei conectări şi deconectări ale transformatorului, la tensiunea nominală.

Punerea sub tensiune a tuturor transformatoarelor de 10 MVA şi mai mari se face, pe cît posibil, ca mai sus.

Sarcina maximă permanent admisă a unui transformator, la o temperatură ambiantă de peste +35° C, este determinată de temperatura admisibilă a uleiului.

Pentru fiecare transformator, pe baza datelor întreprinderii constructoare, se stabileşte temperatura maximă admisibilă în straturile superioare de ulei; această temperatură trebuie să nu depăşească +90 °C.

Sistemul de răcire prin ventilaţie forţată a transformatoarelor fără circulaţie forţată a uleiului se pune în funcţiune conform instrucţiunilor întreprin-

derii constructoare. Pe baza acestora, ventilaţia forţată este pusă în funcţiune la atingerea unei temperaturi de 55 °C a uleiului în straturile superioare.

În caz de incidente se admite funcţionarea transformatoarelor — cu excepţia transformatoarelor cu circulaţie forţată a uleiului — cu următoarele suprasarcini:

— 30% timp de 2 h, 60% timp de 30 min, 75% timp de 15 min, 100% timp de 7,5 min, 140% timp de 3,5 min.

La transformatoarele cu circulaţie forţată a uleiului, suprasarcinile se stabilesc pe baza indicaţiilor întreprinderii constructoare.

La transformatoarele principale, instalate în staţiile de transformare şi în centralele electrice, trebuie să existe posibilitatea urmăririi, cu instrumente de măsurare indicatoare, cel puţin a puterii active şi a curentului pe o fază. În posturile de transformare, unde transformatoarele nu sînt prevăzute cu instrumente de măsurare a sarcinilor, acestea se controlează, în funcţie de condiţiile locale, cel puţin o dată pe an.

Controlul vizual al transformatoarelor constă în verificarea nivelului uleiului în conservator, a temperaturii, a curăţeniei canalelor de scurgere a uleiului şi a etanşeităţii cuvei.

De asemenea se verifică dacă transformatorul nu produce un zgomot neobişnuit şi dacă instalaţia de răcire funcţionează normal.

Transformatoarele sînt prevăzute cu protecţii prin relee împotriva defectelor interne (protecţia de gaze, protecţia diferenţială etc.).

În cazul semnalizării releului de gaze (Buchholz) trebuie să se cerceteze cauza pentru care releul a acţionat.

Dacă gazul dezvoltat nu este inflamabil sau atunci cînd cauza pentru care releul a intrat în acţiune este exterioară transformatorului, acesta poate fi lăsat în funcţiune. Scoaterea lui din funcţiune devine însă obligatorie dacă gazul este inflamabil.

Pentru cercetarea inflamabilităţii gazului, prelevarea acestuia se va face într-un balon de sticlă transparentă, iar aprinderea lui într-un loc lipsit de curenţi de aer.

Dacă transformatorul a fost declanşat prin acţiunea protecţiilor contra defectelor interne, repunerea lui în funcţiune este permisă numai după verificarea stării transformatorului, a funcţionării protecţiei şi după eliminarea eventualelor deteriorări descoperite.

Dacă declanşarea transformatorului are ca urmare întreruperea alimentării cu energie electrică a unor consumatori importanţi, se admite repunerea lui în funcţiune cu aprobarea conducătorului tehnic al unităţii ce exploatează transformatorul, numai pe baza unui control anterior, dacă sînt îndeplinite simultan următoarele condiţii:

— nu s-au dezvoltat gaze inflamabile;

— nu există semne vizibile de avariere a transformatorului;

— declanşarea a fost comandată numai de una dintre protecţiile contra defectelor interne, iar celelalte protecţii nu au funcţionat;

— analiza funcţionării celorlalte protecţii din sistem nu confirmă existenţa unui defect în interiorul transformatorului.

D. INSTALAȚII ELECTRICE DE DISTRIBUȚIE
(Circuite primare)

Prin instalații de distribuție se înțelege acea parte dintr-un sistem electro-energetic în care are loc repartiția energiei electrice spre diferiți consumatori. Într-o serie de cazuri, această repartiție se face după ce anumiți parametri ai energiei electrice (tensiune, frecvență etc.) sînt modificați — corespunzător caracteristicilor receptoarelor sau condițiilor transmisiei — în instalații separate de transformatoare, redresoare, convertizoare etc.

Din categoria instalațiilor de distribuire fac parte:

— instalațiile electrice ale stațiilor de la consumator, ale punctelor de alimentare și ale posturilor de transformare;

— cutiile și tablourile de distribuție.

Instalațiile de distribuție se montează fie în interiorul unor clădiri, fie în exterior. În ambele cazuri, și cu atît mai mult în cazul instalațiilor de distribuție din interior, spațiile de circulație trebuie să fie complet degajate.

În instalațiile de distribuție de tip interior, la cabinele metalice de distribuție montate în exterior și la cutiile cu cleme din stațiile exterioare, toate orificiile pentru trecerea cablurilor și a conductelor dintr-o încăpere în alta și în exterior trebuie să fie închise, respectiv etanșate cu materiale necombustibile.

Elementele conductoare ale instalațiilor de distribuție de tip interior, situate deasupra locurilor de trecere, trebuie să fie protejate, dacă înălțimea lor deasupra pardoselii este mai mică decît:

— 2,5 m la instalațiile cu tensiuni de pînă la 20 kV inclusiv;

— 2,75 m la instalațiile cu tensiuni de peste 20 kV pînă la 35 kV inclusiv;

— 3,50 m la instalațiile cu tensiuni de peste 35 kV pînă la 110 kV inclusiv.

Elementele conductoare ale instalațiilor de distribuție de tip exterior trebuie să fie împrejmuite, dacă înălțimea lor deasupra suprafeței terenului este mai mică decît:

— 3,00 m la instalațiile cu tensiuni pînă la 35 kV inclusiv;

— 3,75 m la instalațiile cu tensiuni între 35 kV și 110 kV inclusiv;

— 4,50 m la instalațiile cu tensiunea de 220 kV;

— 5,50 m la instalațiile cu tensiunea de 400 kV.

Transformatoarele și aparatele care au marginea inferioară a porțelanului izolatoarelor situată la o înălțime mai mică de 2,5 m deasupra terenului trebuie împrejmuite. Înălțimea împrejmuirilor trebuie să fie de cel puțin 1,7 m.

La toate aparatele cu ulei, precum și la izolatoarele de trecere umplute cu ulei se urmărește menținerea nivelului de ulei prescris.

Întregul echipament, precum și ușile celulelor instalațiilor de distribuție trebuie să aibă inscripții care indică destinația elementului respectiv. În afară de aceasta, în instalațiile de distribuție sînt afișate instrucțiuni de manevră, instrucțiuni pentru prevenirea accidentelor și de pază contra incendiilor.

Fiecare întreruptor, precum și dispozitivul lui de acționare trebuie să aibă un indicator pentru semnalizarea pozițiilor „închis“ și „deschis“.

Pentru evitarea manevrelor greșite, toate separatoarele de interior sînt prevăzute cu un sistem de blocare, care nu permite acționarea separatorului

în sarcină. Separatoarele prevăzute și cu cuțite de punere la pămînt au un sistem de blocare care nu permite închiderea cuțitelor de punere la pămînt decît dacă sînt deschise cuțitele principale.

Dispozitivele de acționare ale separatoarelor exterioare sînt prevăzute cel puțin cu posibilitatea de a fi închise cu lacăte. Toate dispozitivele de blocare, prevăzute pentru evitarea manevrelor greșite sau pentru securitatea personalului de exploatare, trebuie menținute în permanentă stare de funcționare.

În instalațiile de distribuție se prevăd puncte accesibile și echipate în consecință ale instalațiilor de legare la pămînt, puncte la care să se poată racorda dispozitivele mobile (scurtcircuitoare) destinate legării temporare la pămînt.

Instalațiile de distribuție trebuie să aibă:

— o cantitate suficientă și numerotată de scurtircuitoare, care trebuie să fie păstrate în rastele, în locuri special amenajate;

— mijloace de protecție, în conformitate cu prevederile din normele de protecție a muncii;

— mijloace pentru stingerea incendiilor, în conformitate cu normele de prevenire și de combatere a incendiilor.

Revizia exterioară (controlul vizual) al instalațiilor de distribuție trebuie să se facă în următoarele termene:

— pentru instalațiile avînd personal de exploatare în tură, o dată pe schimb;

— pentru stațiile electrice cu personal de exploatare la domiciliu, o dată pe zi și, pe lîngă aceasta, o dată pe săptămînă pe întuneric, pentru a se putea stabili existența descărcărilor, efectului corona, contactelor slabe etc.;

— pentru stațiile fără personal de exploatare permanent, o dată pe lună;

— pentru posturile de transformare, cel puțin o dată la șase luni.

O problemă deosebită o constituie depunerile de praf sau de impurități industriale pe izolația instalațiilor de distribuție. Poluarea izolației, atunci cînd este neglijată, poate duce la conturnarea sau chiar la străpungerea izolatoarelor, ceea ce, în final, înseamnă avarierea și ieșirea din funcțiune a instalațiilor.

În zonele industriale, scăderea nivelului izolației instalațiilor electrice depinde de o serie de factori și, în principal, de tipul agentului de contaminare.

Agenții de contaminare mai importanți sînt:

— gazele și pulberile provenite din uzinele chimice;

— pulberile și gazele provenite din exploatările miniere și uzinele siderurgice;

— praful de cărbune și de cenușă volantă provenită din centralele termoelectrice, uzine de înnobilare a minereurilor etc.;

— produse sub formă de pulberi provenite din fabricile de ciment, var, ipsos, carbid;

— îngrășăminte chimice provenite de pe terenuri agricole.

Existența unei game atît de variate de agenți de contaminare, unii dintre ei cu un grad de solubilitate în apă foarte mare, alții cu un coeficient, de aderență la suprafața de porțelan a izolatoarelor de asemenea foarte mare, ridică probleme speciale de prevenire a avarierii instalațiilor electrice prin luarea de măsuri profilactice adecvate.

În primul rînd se impune ca instalațiile de distribuție în zonele contaminate să fie amplasate, față de focarele de contaminare, la o distanță convenabilă și în direcție opusă deplasării vîntului dominant, pentru a nu fi periclitate.

În al doilea rînd, izolația se dimensionează la un nivel superior nivelului necesar impus de tensiunea de exploatare a instalațiilor, astfel încît să prezinte un grad de siguranță ridicat.

Cele mai eficace metode de combatere a contaminării izolației sînt următoarele:

— spălarea (ștergerea) periodică a izolatoarelor, după ce instalația a fost scoasă de sub tensiune;

— protejarea suprafețelor izolante cu unsori de protecție (siliconice sau minerale);

— spălarea izolatoarelor cu instalația sub tensiune.

E. CIRCUITE SECUNDARE

Pentru circuitele secundare de măsurare, control, protecție prin relee, automatizare, comandă, semnalizare, blocare și telemecanizare se utilizează numai cabluri cu conductoare de cupru cu înveliș necombustibil sau greu combustibil. Secțiunea conductoarelor trebuie să fie de cel puțin 2,5 mm^2, pentru circuitele de curent, și de cel puțin 1,5 mm^2, pentru cele de tensiune.

În circuitele secundare ale transformatoarelor de tensiune (cu excepția circuitelor alimentînd regulatoarele de tensiune) și în circuitele de curent operativ continuu și alternativ trebuie să se utilizeze siguranțe calibrate sau întreruptoare automate. Circuitele de protecție prin relee, automatizare și telemecanizare se prevăd cu supravegherea prezenței tensiunii continue.

Rezistența de izolație a circuitelor secundare față de pămînt, măsurată cu megohmmetrul de 500—1 000 V, trebuie să fie de cel puțin 1 MΩ pentru fiecare circuit.

Instalațiile de protecție prin relee, de automatizare și de telemecanizare, date în exploatare, trebuie să fie conectate în stare de funcționare, indiferent dacă instalațiile de înaltă tensiune deservite de ele se află în exploatare sau sînt retrase din exploatare; fac excepție numai dispozitivele a căror deconectare este necesară, în funcție de regimul de funcționare.

Operațiile de verificare și lucrările de montaj efectuate la panourile de protecție prin relee, automatizare și telemecanizare, precum și la circuitele aflate în funcțiune se execută cu luarea unor măsuri speciale de siguranță contra declanșărilor incorecte și numai cu ajutorul sculelor izolate.

Instalațiile de protecție prin relee, de automatizare și de telemecanizare, precum și circuitele secundare respective se verifică periodic pe baza unor programe alcătuite în prealabil de către personalul de specialitate.

Verificarea instalațiilor de protecție prin relee și automatizare, montate pe liniile electrice aeriene se face obligatoriu înaintea sezonului de descărcări atmosferice.

După orice funcționare incorectă a dispozitivelor de protecție, telemecanizare și automatizare se execută o verificare specială, în afara programului de verificări planificate.

La verificarea protecţiei prin relee a instalaţiilor aflate în funcţiune este necesar ca protecţia de rezervă sau cea provizorie (suplimentară) să se afle în funcţiune pentru a asigura în măsura posibilităţilor, selectivitatea protecţiei. Este interzisă lăsarea fără protecţie a unui echipament aflat în exploatare sau în rezervă caldă; este interzisă de asemenea desfacerea (deconectarea) bobinelor de curent fără scurtcircuitarea prealabilă a transformatoarelor respective.

F. LINII ELECTRICE AERIENE

Pentru liniile electrice aeriene se impun numeroase condiţii legate de dimensionarea lor, care trebuie să ţină seamă atît de condiţiile meteorologice ale zonei în care sînt construite, cît şi de traseul lor (apropieri de construcţii, apropieri sau traversări de alte instalaţii industriale, de circuite de telecomunicaţii, apropieri sau traversări ale altor linii electrice aeriene, ale căilor ferate, şoselelor, drumurilor etc.). Aceste condiţii trebuie neapărat păstrate în timpul exploatării liniilor electrice aeriene, nefiind permise abateri de la distanţele stabilite prin proiectarea şi realizate prin construcţie.

Menţinerea în stare normală de exploatare a liniilor electrice aeriene impune şi efectuarea unor lucrări de reparaţii. În vederea stabilirii acestor lucrări, liniile electrice aeriene se supun unei verificări generale:

— o dată pe an, la liniile cu tensiuni de peste 1 kV inclusiv;

— o dată la 2 ani, la liniile cu tensiuni sub 1 kV.

În cadrul acestor verificări generale se face examinarea amănunţită a elementelor constructive şi a zonelor de siguranţă a liniilor (distanţe faţă de clădiri, instalaţii, drumuri, arbori etc.).

În plus, liniile electrice aeriene se supun şi unor supravegheri care, după natura şi conţinutul lor, pot fi împărţite în următoarele categorii:

— supravegheri periodice efectuate vizual, fără retragerea din exploatare a liniilor şi fără urcarea personalului pe stîlpi, urmărind:

— ziua: observarea amănunţită a stării traseului şi a tuturor elementelor liniilor, inclusiv zona de siguranţă;

— noaptea: scoaterea în evidenţă a defectelor clemelor de înnădire şi întindere ale liniilor, observarea descărcărilor parţiale, intensitatea fenomenului de licărire la lanţurile de izolatoare etc.;

— supravegheri speciale, care impun un control amănunţit al liniilor şi care se fac atunci cînd liniile au avut de suferit din cauza chiciurii, a îngheţurilor şi a dezgheţurilor bruşte, furtunilor, inundaţiilor, incendiilor de păduri, deplasărilor de teren etc.;

— supravegheri de depistare a defectelor, care se execută după declanşările liniilor, urmărindu-se stabilirea cauzei declanşării şi locul defectului.

Cu ocazia acestor supravegheri se execută şi lucrări de curăţire a traseelor liniilor de tufişuri, copaci căzuţi în apropiere, materiale rămase de la construcţii şi montaj.

Tăierea crengilor pomilor în zona de siguranţă şi defrişarea pomilor în culoarele liniilor aeriene se face o dată pe an, în perioada de încetare a vegetaţiei arborilor.

G. REȚELE DE CABLURI SUBTERANE

Rețelele de cabluri subterane necesită unele lucrări de exploatare deosebite, dat fiind faptul că acestea reprezintă instalații importante de distribuție, precum și pentru faptul că, fiind îngropate, sînt greu de supravegheat și sînt supuse unor degradări provenite de la diverși agenți chimici conținuți în sol.

Reguli de exploatare a rețelelor de cabluri subterane prevăd în general următoarele:

Pentru fiecare linie de cablu subteran, la darea în exploatare se precizează sarcinile maxime de durată. Acestea se stabilesc ținîndu-se seamă de temperaturile admisibile și de secțiunile conductoarelor cablului.

În cazuri de incidente în rețele se admite o supraîncărcare maximă de vîrf a cablurilor subterane pentru o durată de cel mult două ore, după cum urmează:

— pentru cablurile cu tensiune nominală pînă la 20 kV inclusiv, o supraîncărcare de 10% din sarcina maximă de lungă durată;

— pentru cablurile cu tensiuni nominale de peste 20 kV, izolate cu hîrtie, nu se admit supraîncărcări;

— pentru liniile în cablu subteran cu ulei sau cu gaze sub presiune se vor respecta indicațiile date de furnizor, privind supraîncărcările admisibile.

În rețelele cu neutrul izolat sau prevăzute cu compensarea curenților capacitivi de punere la pămînt se permite funcționarea liniilor în cablu subteran în regimul cu punere la pămînt a unei faze pînă la înlăturarea defectului.

Controlul rețelelor de cabluri subterane cuprinde supravegherea cablurilor amplasate în trasee ce trec prin zone cu pericol de surpare sau prin zone de construcții în lucru. De asemenea, se prevede controlul instalațiilor auxiliare ale cablurilor cu ulei sau cu gaze sub presiune. Se efectuează controale excepționale în perioadele de viituri și după ploi torențiale. În localități cu transporturi electrificate (tramvaie, trenuri) se controlează starea cablurilor din punctul de vedere al coroziunii prin curenți de dispersie (vagabonzi), pe baza măsurării acestor curenți. În cazul în care se constată prezența unor curenți de dispersie cu potențiale și densități periculoase, se iau măsuri pentru prevenirea distrugerii cablurilor prin coroziune electrolitică. De asemenea, se iau măsuri împotriva coroziunii chimice, în cazul în care se constată că apar astfel de fenomene.

Săpăturile pe traseele cablurilor sau lucrările în apropierea acestora se execută numai cu aprobarea întreprinderii de exploatare a rețelelor respective. În astfel de cazuri trebuie să se asigure supravegherea păstrării integrității cablurilor, pe toată perioada efectuării lucrărilor.

Normele de proiectare a rețelelor de cabluri subterane prevăd unele condiții în ceea ce privește respectarea anumitor distanțe dintre traseele cablurilor și alte trasee (traversare de străzi, piețe, intersecții cu căi ferate normale, intersecții cu căi ferate electrificate, intersecții cu alte cabluri subterane electrice cu trasee de conducte termice, petroliere, gaze, aer comprimat etc.).

Aceste condiții trebuie riguros respectate la construcția rețelelor de cabluri subterane, ca și cu ocazia reparării lor sau a înlocuirii unor porțiuni din cabluri.

REZUMAT

- Funcționarea normală a instalațiilor de producere, transport și distribuție a energiei electrice impune norme și instrucțiuni speciale următoarelor tipuri de instalații:
  — generatoare și compensatoare sincrone;
  — motoare electrice;
  — transformatoare;
  — instalații de circuite primare;
  — instalații de circuite secundare;
  — linii electrice aeriene;
  — linii electrice în cablu.
- Pentru fiecare dintre instalațiile respective sînt prevăzute: amplasările constructive, parametrii de funcționare în regim normal și la avarie, condiții de exploatare etc.

ÎNTREBĂRI RECAPITULATIVE

1. *Care sînt condițiile de funcționare ale generatoarelor și compensatoarelor sincrone?*
2. *Ce operații efectuează personalul de exploatare la motoarele electrice?*
3. *Care sînt suprasarcinile admisibile în funcționarea transformatoarelor?*
4. *Care sînt distanțele minime admisibile față de elementele conductoare ale instalațiilor de distribuție?*
5. *Care sînt verificările de supraveghere la liniile electrice aeriene?*

CAPITOLUL 17

TENSIUNEA CA PARAMETRU AL CALITĂȚII

Abaterile maxime admisibile ale tensiunii de serviciu, față de tensiunea nominală, sînt normate.

Abaterile procentuale admise ale tensiunii de serviciu pentru rețelele de joasă tensiune sînt indicate în tabelul 17.1.

TABELUL 17.1

Abateri admise de la tensiunea nominală în rețelele de joasă tensiune

Tensiunea nominală a rețelei U_n V	Tipul rețelei și al consumatorului de alimentat		Abaterile procentuale admisibile %
380/220	Aeriană	aglomerări cu mai puțin de 1 000 locuitori/km²	± 10
		aglomerări cu mai mult de 1 000 locuitori/km²	± 7
	Subterană	orice tip de consumatori	± 5
660	Aeriană și subterană	orice tip de consumatori	± 5
1 000	Aeriană și subterană	consumatori industriali	± 10
		distribuție publică	Nu se normează

Pentru rețelele cu tensiuni nominale de 6, 10 sau 20 kV, abaterile procentuale ale tensiunii de serviciu nu sînt normate, decît în cazul în care, la aceste rețele, sînt cuplate nemijlocit receptoare de energie electrică. În acest caz, limitele admisibile ale abaterilor procentuale vor fi de ± 5%.

Abaterile procentuale ale tensiunii de serviciu pentru rețelele cu tensiuni nominale de 110 și 220 kV trebuie să fie cuprinse între limitele de ± 10%. Pentru rețelele de 400 kV și 750 kV, aceste abateri nu se normează.

A. CONSECINȚELE PRINCIPALE ALE ABATERILOR DE LA VALOAREA NOMINALĂ A TENSIUNII

Funcționarea receptoarelor la tensiuni mai mici decît cele nominale are o serie de consecințe, și anume:

— la motoarele asincrone și sincrone ale mașinilor-unelte, variația de tensiune nu este sesizabilă, deoarece turația acestor motoare nu depinde

practic * de tensiune. În schimb scade eficacitatea motoarelor în sensul că curentul absorbit și uzura motorului vor crește. Cele mai neplăcute urmări ale scăderii tensiunii sub limitele admise le reprezintă încălzirile excesive, deteriorarea izolației și, în final, scoaterea în indisponibilitate a motoarelor;

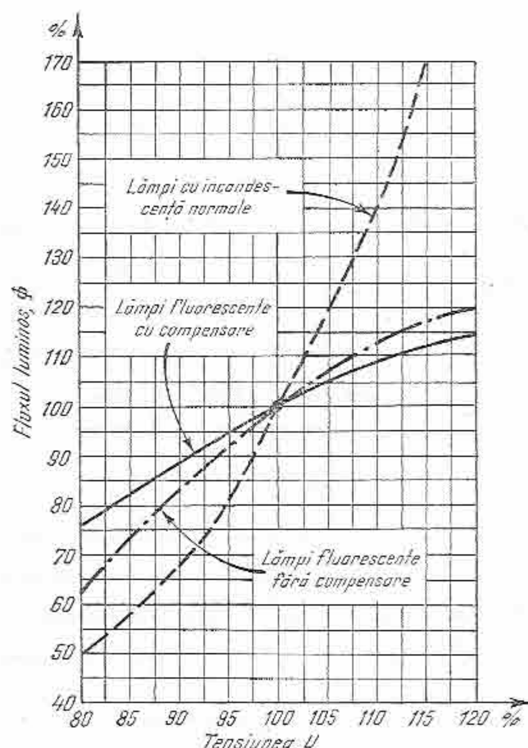


Fig. 17.1. Variația fluxului luminos al lămpilor cu incandescență și celor fluorescente, în funcție de variația efectivă a tensiunii.

— la motoarele cu excitație serie, odată cu scăderea tensiunii scade turația și, în consecință, scade și productivitatea mașinii antrenate, precum și eficacitatea motorului;

— la lămpile fluorescente, prin scăderea tensiunii se produce și o scădere proporțională a fluxului luminos. Sub o anumită valoare a tensiunii, tubul fluorescent nu mai lucrează;

— la lămpile cu incandescență, prin scăderea tensiunii se produce o scădere mult mai puternică a fluxului luminos. Totodată, în acest caz, se produce și o scădere considerabilă a calității luminii, prin creșterea pronunțată a radiațiilor roșii, ceea ce o face, uneori, aproape imposibil de utilizat.

Cele expuse cu privire la lămpile electrice sînt reprezentate grafic și în figura 17.1.

În tabelul 17.2 sînt cuprinse variațiile principalilor parametri, la o scădere a tensiunii cu 15% față de valoarea nominală.

TABELUL 17.2

Variațiile parametrilor principalilor consumatori, la o scădere a tensiunii cu 15% și la o frecvență constantă, în %

Consumatorul	Uzura	Curentul	Puterea activă	Turația	Eficacitatea	Fluxul luminos
Motoare asincrone	+450	+15	−2	0	−26	—
Motoare sincrone	+645	+17,5	0	0	−28	—
Motoare serie	−55	−10	−15 la −24	−12	−15	—
Cabluri și transformatoare	−56 la −80	−15,5 la −30	−12 la −27		−2,8 la −6,5	—
Tuburi fluorescente	—	−15	−18 la −25	—	0	−15
Lămpi cu incandescență	−90	−12	−25	—	−28	−48

* La motoarele asincrone, turația se modifică puțin cu variația tensiunii.

Scăderea tensiunii sub limitele admise influenţează şi procesele termice. Puterea cuptoarelor electrice şi, în general, a tuturor elementelor, utilizate pentru încălzirea electrică variază cu pătratul tensiunii, ceea ce influenţează puternic calitatea produselor tratate termic pe cale electrică şi contribuie la scăderea producţiei. Creşterile valorii efective a tensiunii peste limitele admise conduc la solicitări sporite ale izolaţiei electrice, la îmbătrînirea prematură a acesteia şi la deteriorarea ei. Acelaşi fenomen îl suportă şi rezistenţele ohmice pentru încălzire sau filamentele lămpilor cu incandescenţă.

B. CONSECINŢELE PRINCIPALE ALE ABATERILOR DE LA FORMA SINUSOIDALĂ A TENSIUNII

Forma undei de tensiune produse de generatoarele de curent alternativ nu este perfect sinusoidală. Din punct de vedere matematic, această curbă apropiată de o sinusoidă, poate fi descompusă într-o armonică fundamentală de valoare U_1 şi într-o serie de armonici superioare (de valori U_2, U_3, ..., U_n). Se spune în acest caz că unda de tensiune este deformată.

Consecinţele apariţiei unor armonici superioare şi a unor frecvenţe înalte sînt în principal următoarele:

— în instalaţiile de distribuţie, oscilaţiile electromagnetice produse de arcul electric al cuptoarelor electrice în special, avînd un caracter discontinuu, cu frecvenţe preponderent înalte, pot produce vibraţii mecanice, urmate de distrugeri de instalaţii, prin intrarea în rezonanţă a acestora;

— apar în instalaţii vehiculări de puteri deformante care nu sînt înregistrate de contoarele electrice şi care încarcă în mod inutil instalaţiile;

— tensiunea efectivă măsurată de voltmetrele magnetoelectrice nu este cea reală, deoarece etalonarea lor s-a făcut la o curbă sinusoidală;

— la motoarele electrice, apariţia unor frecvenţe înalte duce la încălziri suplimentare, şi deci la îmbătrînirea mai rapidă a izolaţiei sau la imposibilitatea de a le încărca la sarcină nominală;

— la aparatele casnice care funcţionează pe bază de rezistenţe, armonicile superioare, contribuind la micşorarea tensiunii efective, fac ca receptoarele să lucreze la puteri mai mici decît cele nominale;

— la aparatele de radio şi de televiziune se modifică încălzirea filamentelor lămpilor, ca urmare a micşorării tensiunii efective, influenţîndu-se astfel negativ recepţia auditivă, luminozitatea tubului catodic şi dimensiunile imaginii. Dacă armonicile superioare pătrund direct în aparate, atunci apar paraziţi radiofonici şi desincronizări ale televizoarelor;

— aparatele electromedicale, electroterapeutice îşi modifică parametrii de funcţionare. În aparatele cu circuite de intrare foarte sensibile, aşa cum sînt electrocardiografele, electroencefalografele, pătrunderea armonicilor superioare din reţea poate duce la apariţia pe hîrtia fotografică a aparatelor a unor înregistrări de impulsuri parazite care nu au nimic comun cu starea bolnavului.

C. CONSECINȚELE PRINCIPALE ALE DEZECHILIBRULUI TENSIUNILOR POLIFAZATE

În ultimul timp apar tot mai des aparate monofazate și bifazate, care se racordează între o fază și neutru, respectiv între două faze, și cu puteri absorbite din ce în ce mai mari, cum sînt: mașinile electrice de gătit, aparatele de sudare, tracțiunea electrică alimentată în curent alternativ etc.

Prin utilizarea acestor genuri de aparate apar dezechilibrări mari, manifestate prin apariția unor componente inverse (cînd racordarea are loc între două faze) și a unor componente inverse și homopolare (cînd racordarea se efectuează între fază și neutru). Efectele componentei inverse se concretizează prin:

— circulație de curenți inverși și apariția de cîmpuri inverse în mașinile electrice, care au drept consecință, la motoarele asincrone, o creștere a pierderilor, și deci o scădere a randamentului, iar la generatoarele sincrone, o creștere a încălzirilor înfășurărilor de amortizare;

— o variație a valorii efective a tensiunii, care afectează buna funcționare a aparatelor monofazate;

— înregistrări eronate ale aparatelor de măsurare, în special ale contoarelor electrice.

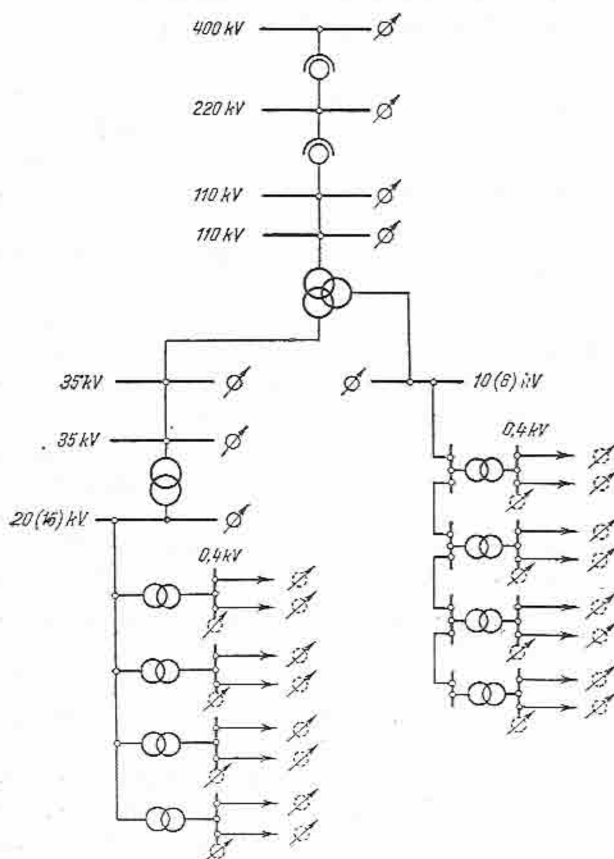


Fig. 17.2. Punctele sistemului energetic în care se măsoară tensiunile.

D. METODOLOGII DE URMĂRIRE A NIVELURILOR DE TENSIUNE ÎN SISTEMELE ELECTROENERGETICE

În sistemele energetice, nivelurile de tensiune sînt urmărite permanent sau periodic (fig. 17.2).

1. METODOLOGIA DE URMĂRIRE A NIVELURILOR DE TENSIUNE ÎN REȚELELE DE ÎNALTĂ TENSIUNE ȘI ÎN STAȚIILE DE TRANSFORMARE

În rețelele de înaltă tensiune, inclusiv stațiile de transformare, metodologia prevede o fază de calcul preliminar al regimului de funcționare în mai multe alternative, ținînd seamă și de gradul de siguranță necesar, calcule care se efectuează în general prin programare la calculatorul electronic. Se stabilesc pe această bază benzile de tensiuni admisibile, care se transmit personalului de tură din stații, pentru respectare.

2. METODOLOGIA DE URMĂRIRE A NIVELURILOR DE TENSIUNE ÎN REȚELELE DE MEDIE TENSIUNE

În rețelele de medie tensiune, pe baza circulațiilor preconizate la orele de vîrf și la orele de gol de sarcină, atît vara cît și iarna, se stabilesc configurațiile rețelei, ținîndu-se seamă atît de gradul de siguranță necesar, cît și de nivelurile de tensiuni, pentru ca acestea să se mențină în benzi admisibile. Avîndu-se elementele primare predeterminate ca și în cazul rețelelor de înaltă tensiune, calculul variantelor ce se recomandă a fi alese poate fi efectuat prin programare corespunzătoare la calculatoarele electronice.

Se stabilesc, în același timp, ploturile pe care vor funcționa transformatoarele din posturile de transformare care, în marea lor majoritate, sînt comutatoare ce se pot manevra fără sarcină și fără tensiune.

O dată stabilite configurația și poziția ploturilor se trece la realizarea lor practică și apoi se verifică prin măsurări de tensiune, care se fac de obicei la bara stației de plecare a liniei, la un post de transformare aflat la mijlocul liniei și la un post terminal pe linia respectivă.

3. METODOLOGII DE URMĂRIRE A NIVELURILOR DE TENSIUNE ÎN REȚELELE DE JOASĂ TENSIUNE

O situație mai complicată o prezintă măsurările de sarcină și de tensiune care trebuie efectuate în rețelele de joasă tensiune, deoarece necesită atît un volum mare de muncă, cît și găsirea exactă a vîrfului de sarcină maximum maximorum anual.

Măsurările de sarcină și de tensiune cu instrumente indicatoare. Aceste măsurări se efectuează de două ori pe an, la orele de vîrf de sarcină, iarna și vara. În condițiile țării noastre, pentru stabilirea căderilor de tensiune se iau în considerare măsurările efectuate iarna. Metoda este destul de simplă tehnic, dar foarte greoaie organizatoric, necesitînd un volum mare de muncă și de date statistice. Se procedează în felul următor: presupunîndu-se o rețea de joasă tensiune, care are o schemă cum este cea din figura 17.3, se măsoară curenții I pe cele trei faze și pe neutru, la coloana de joasă tensiune a transformatorului, cu ajutorul unui cleşte-ampermetru, cu o scară convenabil aleasă.

Cu cît curenții pe cele trei faze vor fi mai diferiți, cu atît încărcările vor produce căderi de tensiune mai diferite. Prima măsură ce se impune este echilibrarea sarcinilor pe faze. Se măsoară apoi curenții i_1 și i_2 pe cele două ramuri și, de asemenea, pe cele trei faze și pe neutrul fiecărei ramuri. Pe cît posibil, simultan se măsoară tensiunile pe faze la barele postului U și la capetele rețelelor U_A și U_B.

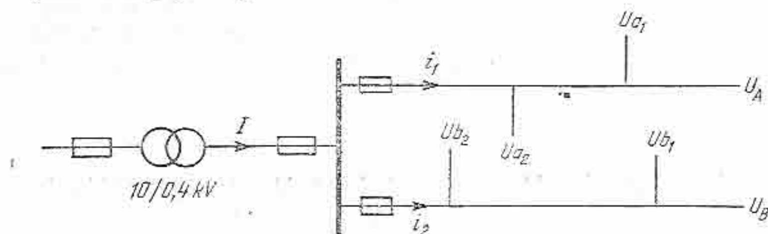


Fig. 17.3. Punctele rețelelor de joasă tensiune în care se măsoară periodic tensiunea și curenții.

Căderile de tensiune se vor deduce pentru fiecare caz în parte; de exemplu, pentru cazul punctului U_{a1} din relația:

$$\Delta U = \frac{U - U_a}{U} \times 100 [\%]. \tag{17.1}$$

Pentru a se putea obține un indicator statistic comun, în special pentru rețelele de joasă tensiune care alimentează consumatorii casnici, se ia în considerare numărul de abonați măsurați cu căderi de tensiune sub valorile admise.

Acest număr se raportează la totalul numărului de abonați, rezultînd în procente numărul de abonați cu tensiuni necorespunzătoare n, din numărul total de abonați.

Orientativ, valoarea acestui număr este indicată în figura 17.4.

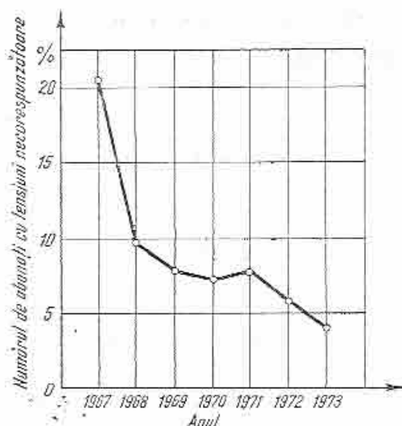


Fig. 17.4. Valori ale numărului de abonați casnici cu căderi de tensiune peste 5% U_n, raportat la numărul total de abonați (în procente).

O altă metodă, care însă presupune o scumpire a instalațiilor, constă din utilizarea, cu montare fixă în posturile de transformare, pe fiecare fază în parte, de ampermetre și voltmetre cu inerție termică mare și cu ac indicator. Personalul de serviciu trece periodic prin posturile de transformare, citește și notează indicațiile date de indicatoarele de maximum și de minimum și le readuce la poziția zero.

Măsurările de sarcină și de tensiune cu instrumente înregistratoare. Această metodă este mai evoluată decît cea descrisă anterior și constă din montarea temporară, pe o perioadă de 24 sau de 48 de ore, a unui ampermetru sau voltmetru înregistrator, care înregistrează variațiile în timp ale parametrilor respectivi.

Metoda expusă nu are un caracter periodic, ci se utilizează numai în anumite cazuri, sesizate de abonaţi.

Măsurări ale variaţiilor de tensiune cu ajutorul voltmetrului integrator. Cea mai modernă metodă utilizată în prezent pentru înregistrarea în timp a variaţiilor de tensiune o reprezintă utilizarea voltmetrelor statistice, denumite şi voltmetre integratoare pentru determinarea calităţii tensiunii de reţea.

Graficul de variaţie a tensiunii într-un punct al reţelei, pentru un interval de timp dat, poate fi pe deplin caracterizat prin următorii indici:

— *Valoarea medie V a abaterii* ΔU de la tensiunea nominală U_n în timpul T, definită de relaţia:

$$V = \frac{1}{2}\int_0^T \Delta U \cdot dt, \tag{17.2}$$

care fixează nivelul mediu la care este furnizată calitativ energia electrică.

— *Valoarea abaterii medii pătratice* V^2, definit prin formula:

$$V^2 = \frac{1}{T}\int_0^T (\Delta U)^2 \cdot dt, \tag{17.3}$$

care caracterizează practic uniformitatea tensiunii. El este cu atît mai scăzut cu cît calitatea tensiunii este mai bună. Acest indicator se mai numeşte şi *indicator de iregularitate a tensiunii.*

— *Abaterea-standard sau abaterea tip* σ este un indicator suplimentar, care este o funcţie de ΔU şi ΔU^2.

Valori mari ale abaterii medii V indică necesitatea schimbării plotului de funcţionare a transformatorului de alimentare.

Valori ridicate ale pătratului abaterii medii pătratice V^2 indică o calitate slabă a energiei electrice, necesitînd un reglaj corespunzător şi în reţelele de medie şi de înaltă tensiune.

Valori mari ale *indicelui de abatere standard* σ indică în general necesitatea de a se îmbunătăţi structural reţeaua de joasă tensiune respectivă (schimbări de secţiuni, noi puncte de injecţie etc.).

E. REGLAREA TENSIUNII ÎN SISTEMELE ELECTROENERGETICE

Într-un sistem electroenergetic, tensiunea este variabilă în timp. Variaţiile în timp pot fi lente după curba de sarcină zilnică, sau rapide, provocate de incidente în centrale sau în reţelele electrice.

Variaţiile lente, care conduc la abateri în plus sau în minus faţă de tensiunea nominală, trebuie să se încadreze în benzile de tensiune prestabilite pentru fiecare bară şi fiecare nivel de tensiune a unei staţii de transformare.

Pentru asigurarea tensiunii în limitele admisibile se utilizează două genuri de reglaje:

— reglarea centralizată, realizată prin reglarea puterii reactive produse de generatoare sau schimbarea ploturilor transformatoarelor-bloc cu generatoarele;

— reglarea descentralizată, realizată prin schimbarea ploturilor transformatoarelor coborîtoare, ale autotransformatoarelor, ale transformatoarelor de reglare, reglarea compensatoarelor sincrone sau a condensatoarelor statice.

1. REGLAREA CENTRALIZATĂ

Generatoarele sincrone. Regimul de funcţionare a generatorului este caracterizat de cinci parametri, şi anume: puterea activă P, puterea reactivă Q, curentul de excitaţie i, tensiunea U şi frecvenţa f. Dependenţa dintre aceşti factori este de aşa natură încît, dacă sînt daţi patru dintre ei, cel de-al cincilea rezultă.

Rezerva de putere reactivă la un generator depinde în mare măsură de puterea activă P şi de tensiunea U la bornele generatorului. În funcţie de puterea activă şi pentru diferite tensiuni se pot ridica diagrame tip de puteri reactive disponibile ale generatoarelor. Ca urmare, la puteri active mari şi menţinîndu-se aceeaşi tensiune, puterea reactivă se reduce substanţial; deci, la puteri active mari şi la tensiuni scăzute, printr-o descărcare neînsemnată a puterii active a generatoarelor din centrale se poate obţine o creştere însemnată a puterii reactive disponibile. Cu cît tensiunea este mai ridicată, cu atît efectul menţionat este mai mic.

În sistemul energetic, pentru a se pregăti din timp vîrful de sarcină zilnic, care atrage după sine o scădere a tensiunii, se încarcă la sarcină maximă reactivă generatoarele din centralele electrice. Se evită astfel supraîncărcările statoarelor generatoarelor şi scăderile în lanţ ale tensiunilor.

Această operaţie devine şi mai eficace dacă, simultan cu încărcarea reactivă înainte de vîrful de sarcină, se comută şi ploturile cu reglaj sub sarcină ale transformatoarelor din sistem în sensul coborîrii tensiunii în medie tensiune înspre limitele minime ale benzilor de tensiune stabilite.

Transformatoarele ridicătoare. Raportul de transformare al transformatorului ridicător este corect ales numai dacă generatorul cu care acesta funcţionează bloc sau generatoarele ce debitează pe bara care se leagă la sistem prin transformatorul respectiv se pot încărca la curenţi nominali statorici şi rotorici, iar puterea activă este cea nominală. În acest caz este utilizată întreaga putere reactivă a generatoarelor respective.

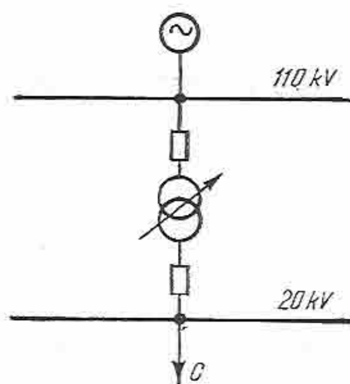


Fig. 17.5. Schema de racordare în sistem a unui transformator coborîtor.

2. REGLAREA DESCENTRALIZATĂ

Transformatoarele coborîtoare sînt utilizate, în special, pentru alimentarea reţelelor de medie tensiune, ale unor sisteme locale (fig. 17.5). Pentru asigurarea unui nivel de tensiune cît mai constant la consumatori, aceste transformatoare sînt prevăzute cu reglarea sub sarcină a tensiunii şi cu dispozitive de reglare automată a tensiunilor.

Tensiunea la barele de 110 kV trebuie să fie menținută înspre valoarea maximă a benzii în orele de vîrf de sarcină și înspre valoarea minimă la golurile de sarcină ale sistemului.

Această acțiune nu face altceva decît să mențină o aceeași tensiune la consumatori, dar permițînd în schimb să se crească tensiunea în rețeaua de înaltă tensiune, și deci, implicit, cel puțin menținerea aceluiași nivel de tensiune pe barele de medie tensiune.

Dacă sistemul energetic are suficientă rezervă de putere reactivă, atunci transformatoarele coborîtoare pot fi reglate înspre raportul maxim de transformare. Dacă sistemul energetic prezintă deficit de putere reactivă, atunci, parțial, o serie de transformatoare coborîtoare pot fi fixate pe rapoarte de transformare mai mici.

Compensatoarele sincrone și condensatoarele statice. Prin variația puterii reactive produse de acestea se pot obține nivelurile de tensiune dorite.

Compensatoarele sincrone permit un reglaj fin al tensiunii, ele fiind racordate fie la înfășurarea terțiară a unui autotransformator (fig. 17.6, *a*), fie la bara stației de transformare (fig. 17.6, *b*).

Condensatoarele statice montate în paralel permit un reglaj în trepte al tensiunii, ele fiind racordate fie la înfășurarea terțiară a unui autotransformator (fig.17.7,*a*), fie la bara de medie tensiune a stației (fig. 17.7,*b*).

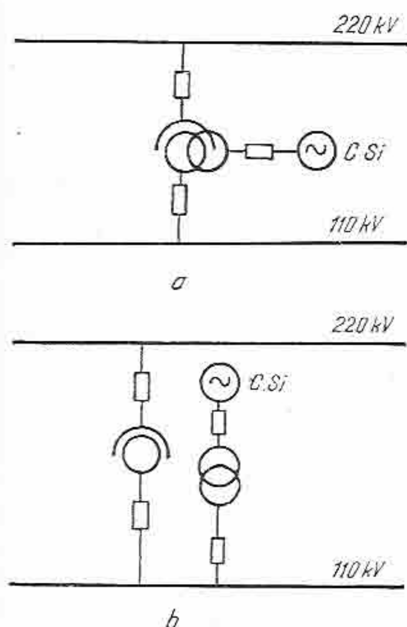


Fig. 17.6. Scheme de racordare a unui compensator sincron (*CSi*).

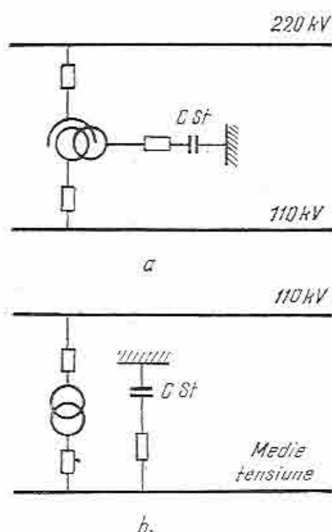


Fig. 17.7. Schema de racordare a unei baterii de condensatoare statice (*CSt*) montate în paralel.

Condensatoarele statice montate în serie (fig. 17.8) compensează reactanța liniei și prin aceasta micșorează căderea de tensiune. Față de montajul în

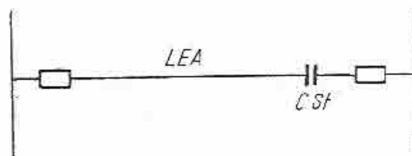


Fig. 17.8. Schema de racordare a unei baterii de condensatoare statice (CSt) montate în serie.

paralel, condensatoarele statice montate în serie au dezavantajul că micșorează gradul de siguranță al instalației respective, prin avarierea lor avariindu-se și linia de alimentare.

REZUMAT

- Tensiunea reprezintă un parametru de calitate normat atît ca valori procentuale ale abaterii, cît și ca formă apropiată de o sinusoidă.
- Abaterea tensiunii cu valoare procentuală, ca deformare cît și ca dezechilibru al fazelor, are efecte nefavorabile asupra consumatorilor.
- În scopul asigurării calității energiei electrice se efectuează urmărirea periodică a nivelurilor de tensiune în diverse puncte ale rețelei.
- Pentru asigurarea tensiunii în limite admisibile se efectuează două feluri de reglaje: centralizat și descentralizat.

ÎNTREBĂRI RECAPITULATIVE

1. *Care sînt abaterile de tensiune admisibile față de valorile normale?*
2. *Care sînt consecințele principale ale abaterilor de tensiune de la valoarea normală asupra diferitelor receptoare?*
3. *Care sînt efectele apariției armonicilor superioare datorite deformării curbei de tensiune?*
4. *Care sînt consecințele principale ale dezechilibrului tensiunilor polifazate?*
5. *Care sînt metodologiile de urmărire a nivelurilor de tensiune în diversele puncte ale sistemului electroenergetic?*
6. *Cum se efectuează reglarea tensiunii într-un sistem electroenergetic?*

CAPITOLUL 18

FRECVENȚA CA PARAMETRU AL CALITĂȚII

Variația de frecvență admisă, față de valoarea nominală de 50 Hz, este de −0,1 Hz, respectiv +0,05 Hz, adică poate să scadă sau să crească între 49,9 și 50,05 Hz.

A. CONSECINȚELE PRINCIPALE ALE ABATERILOR DE LA FRECVENȚA NOMINALĂ

Frecvența curentului alternativ influențează buna funcționare a utilajelor, în special în direcția acționărilor electrice.

Motoarele sincrone și asincrone au turația proporțională cu frecvența curentului alternativ. În consecință, orice scădere a frecvenței duce la o scădere proporțională a turației motoarelor, ceea ce are ca efect o micșorare a productivității mașinilor acționate. Debitul pompelor este mai puternic influențat, deoarece el variază în general direct proporțional cu pătratul frecvenței.

Motoarele serie nu au turația influențată de variația frecvenței. De asemenea, nici lămpile cu incandescență sau tuburile fluorescente nu sînt influențate sub aspectul fluxului luminos.

În afara consecințelor pe care le are variația de frecvență asupra consumatorilor propriu-ziși, influențe negative apar și în funcționarea economică a motoarelor electrice sincrone și asincrone a căror eficacitate scade cu frecvența (eficacitatea reprezentînd raportul dintre puterea activă consumată și pierderile ce o însoțesc în aparatul respectiv).

B. MĂSURI PENTRU MENȚINEREA UNEI FRECVENȚE CÎT MAI CONSTANTE

Un sistem electroenergetic interconectat poate funcționa numai dacă frecvența în întregul sistem este aceeași, indiferent de numărul de grupuri producătoare de energie electrică racordate la acest sistem.

Menținerea unei frecvențe cît mai constante este în strînsă legătură cu alura curbei de sarcină, dată de consumatorii sistemului energetic respectiv. În acest scop se duce o muncă intensă de preliminare a curbelor de sarcină, pe ziua, pe luna, pe trimestrul și pe anul viitor, stabilindu-se astfel grupurile care vor funcționa, încărcările acestora, duratele de funcționare, astfel încît să se poată obține alături de o frecvență constantă și un regim de funcționare cît mai economic.

După această măsură de prevedere, de programare, urmează o a doua etapă, aceea de urmărire permanentă a modului în care se realizează curba de sarcină preliminată, de urmărire permanentă a frecvenței sistemului și de porniri, opriri, încărcări și descărcări de grupuri producătoare.

Ambele etape se realizează organizatoric prin dispecerii sistemului energetic interconectat, grupa de regimuri executînd preliminarea curbelor de sarcină și a grupurilor care vor funcționa, iar grupa operativă urmărind realizarea fizică a programului respectiv.

În cazul interconectării sistemelor energetice ale diferitelor țări, în care fiecare partener trebuie să-și mențină un schimb de puteri prestabilit, se utilizează o instalație de reglare automată frecvență-putere. Aceasta, comandată automat de la pupitrul de comandă al dispecerului național al fiecărei țări, poate realiza următoarele:

— reglarea automată a puterii de schimb, respectiv menținerea constantă a soldului puterii de consum pe liniile de interconexiune, indiferent de valoarea frecvenței în sistemul respectiv;

— reglarea automată a frecvenței la valoarea de consemn, utilizată în mod curent la funcționarea izolată a sistemului;

— reglarea automată simultană a puterii de schimb, cu corecție de frecvență.

Această instalație automată execută comenzi de încărcare a centralelor electrice, prestabilite pentru reglarea frecvenței, corelat cu schimburile de puteri prestabilite pe liniile de interconexiuni.

Apar însă cazuri nedorite de avarii, care pot separa un sistem energetic în două sau în mai multe zone. În aceste cazuri este posibil ca sursele de producere de care dispune o zonă să fie mai reduse decît necesarul solicitat de consumatorii zonei. În aceste condiții, pentru a nu avea loc o cădere a tuturor grupurilor producătoare, prin supraîncărcarea lor, se iau măsuri de deconectare manuală sau automată a unor categorii de consumatori, astfel încît sistemul energetic al zonei respective să se poată menține în funcțiune, cu toate grupurile producătoare, la o frecvență convenabilă, iar repunerea în paralel să se poată astfel efectua cît mai rapid posibil între zona deficitară și celelalte zone.

REZUMAT

- Frecvența ca parametru de calitate al energiei electrice impune menținerea acesteia între limitele 49,9 și 50,05 Hz.
- Abaterile de frecvență au efecte negative asupra mașinilor electrice rotative.
- Pentru interconectarea sistemelor energetice se impune folosirea unei instalații automate de reglare frecvență-putere.

ÎNTREBĂRI RECAPITULATIVE

1. *Care sînt consecințele principale ale abaterii frecvenței de la valoarea de consemn?*
2. *Ce măsuri se întreprind pentru menținerea frecvenței la o valoare cît mai constantă?*
3. *Care sînt modalitățile de reglare automată frecvență-putere în cazul sistemelor energetice interconectate?*

CARACTERIZAREA ŞI PARAMETRII DE SIGURANŢĂ ÎN FUNCŢIONARE

A. PRINCIPALELE ACTIVITĂŢI ALE SECTORULUI ENERGETIC. CONTROLUL CALITĂŢII ACESTORA

Procesele de producere, transport şi distribuţie a energiei electrice şi toate activităţile care concură la desfăşurarea în bune condiţii a acestora sînt redate sintetic în figura 19.1. S-au notat cu linie plină activităţile care au loc în unităţile de producere sau de transport şi distribuţie a energiei electrice, iar cu linie întreruptă — activităţile care se execută, fie în unităţile proprii, fie în unităţi terţe.

În **activitatea de cercetare**, controlul calităţii lucrărilor se exercită de *comisia tehnică internă* a unităţii care efectuează cercetarea şi de *consiliul tehnico-economic* al beneficiarului.

În **activitatea de proiectare**, controlul calităţii documentaţiilor se exercită de *comisia tehnică internă* a unităţii întocmitoare şi de *consiliul tehnico-economic* al beneficiarului.

În **activitatea de lucrări noi**, controlul calităţii lucrărilor se exercită de personal al executantului însărcinat cu această atribuţie, precum şi de personal al beneficiarului (diriginţi de şantier sau alt personal de specialitate).

În final, lucrarea se recepţionează de o *comisie de recepţie*, care cuprinde delegaţi ai beneficiarului, ai proiectantului, ai executantului şi ai principalilor furnizori, la care sînt cooptaţi şi alţi specialişti.

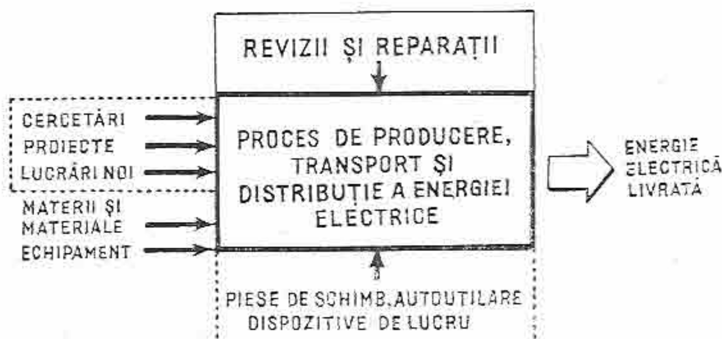


Fig. 19.1. Activităţile care concură la desfăşurarea procesului de producere, transport şi distribuţie a energiei electrice.

În **activitatea de confecții piese de schimb, autoutilare, dispozitive de lucru,** regimul controlului de calitate al produselor este cel specific ramurii construcții de mașini, fiecare unitate avînd organizat controlul său tehnic de calitate.

În **activitatea de recepție a echipamentelor, a materiilor prime și a materialelor,** beneficiarul acestor produse le recepționează cantitativ la sosire, iar calitativ în două moduri:

— pentru produsele de serie mică, la sosire;

— pentru produsele importante, indiferent dacă furnizorul este din țară sau din exterior, prin grupe de recepție proprii la furnizori, așa cum este cazul: cărbunilor, cablurilor, echipamentelor de comutație primară, utilajelor principale din centralele electrice (turbine, cazane, generatoare), izolatoarelor etc.

În **activitatea de revizii și reparații,** controlul de calitate al lucrărilor se exercită pe trei căi:

— autocontrolul, efectuat de însăși persoana care execută operația;

— controlul efectuat pe parcurs de șeful ierarhic superior;

— controlul final prin înscrierea rezultatelor în procesul-verbal de recepție și de redare în exploatare încheiat între personalul de reparații care a executat lucrarea și cel de exploatare, care preia instalațiile după revizie sau reparație.

După cum s-a arătat în capitolul 1, parametrii de calitate ai energiei electrice alternative sînt: continuitatea în alimentarea cu energie electrică a consumatorilor, precum și menținerea unui nivel cît mai constant de tensiune ci frecvență, la valorile nominale ale acestora.

B. INTERDEPENDENȚA ECONOMICĂ DINTRE INSTALAȚIILE FURNIZORULUI ȘI CELE ALE CONSUMATORULUI DE ENERGIE ELECTRICĂ SUB ASPECTUL PARAMETRILOR DE CALITATE AI ENERGIEI ELECTRICE

Calitatea energiei electrice livrate consumatorilor poate fi influențată atît de instalațiile de producere, transport și distribuție a energiei electrice, cît și de receptoarele consumatoare de energie electrică. Pe de o parte, instalațiile furnizoare de energie electrică sînt cu atît mai costisitoare cu cît asigură o calitate mai bună a energiei electrice, iar, pe de altă parte, receptoarele utilizate de consumatori sînt cu atît mai scumpe cu cît permit o variație mai largă a parametrilor care determină calitatea energiei electrice.

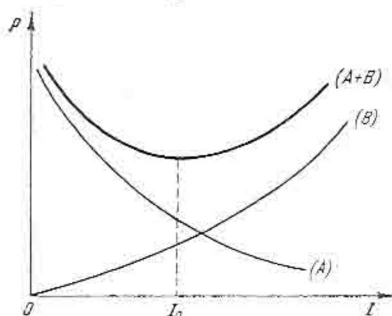


Fig. 19.2. Relația între gradul de imperfecție a calității energiei electrice și cheltuielile de investiții.

Între gradul de imperfecțiune a calității energiei electrice și receptoarele consumatorilor trebuie căutat un punct optim în ceea ce privește cheltuielile minime. Acest optim se poate exprima grafic conform figurii 19.2.

În abscisă este trecut gradul de imperfecțiune a calității energiei electrice I,

iar în ordonată valorile P, care reprezintă, în cazul curbei A, cheltuielile ce trebuie suportate pentru construirea şi exploatarea instalaţiilor de alimentare, iar în cazul curbei B, costurile suplimentare ale abonaţilor, generate de imperfecţiunea calităţii energiei electrice.

Optimul va fi în punctul în care suma celor două genuri de cheltuieli, curba $A + B$ este minimă, deci la un grad de imperfecţiune I_0.

C. GRUPAREA CONSUMATORILOR ŞI NIVELURILE DE REZERVARE PE CARE LE ASIGURĂ INSTALAŢIILE FURNIZORULUI DE ENERGIE ELECTRICĂ

Delimitarea fizică între instalaţiile furnizorului şi cele ale consumatorului de energie electrică se efectuează, în principiu, la agregatele de măsurare a energiei electrice.

În ţara noastră, în funcţie de puterea maximă absorbită în punctul de consum, sînt normate patru clase de consumatori de energie electrică (tabelul 19.1, clasele A, B, C şi D).

TABELUL 19.1

Calitatea nivelurilor de rezervare

Nivel de rezervare	Consumul asigurat în caz de întrerupere simplă	Durata de nealimentare				Observaţii
		Clasa *A* peste 50 MVA	Clasa *B* 7,5—50 MVA	Clasa *C* 2,5—7,5 MVA	Clasa *D* sub 2,5 MVA	
1	Integral	3 s	3 s	3 s	3 s	Durata de acţionare a automaticii de sistem
2	Integral	30 min	30 min	2 h	2—8 h	Durata necesară efectuării de manevre pentru izolarea defectului şi realimentarea pe calea de rezervă
3	Nimic	Se va stabili de la caz la caz, în funcţie de condiţiile locale şi de structura schemei de alimentare				

În cadrul claselor de consumatori, alimentarea cu energie electrică se poate realiza cu unul dintre următoarele niveluri de rezervare în căile de alimentare:

— nivelul 1, cu rezervare de 100%; căile de alimentare CA_1 şi CA_2 sînt independente şi sînt racordate în puncte distincte de alimentare PA_1 şi PA_2 (fig. 19.3, *a*);

— nivelul 2, cu rezervare de 100%; căile de alimentare CA_1 şi CA_2 sînt independente, însă pot fi racordate în acelaşi punct de alimentare PA (fig. 19.3, *b*);

— nivelul 3, fără rezervare (fig. 19.3,*c*).

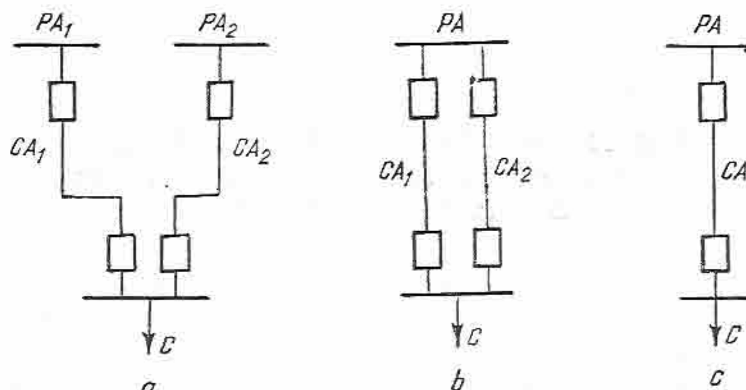


Fig. 19.3. Schema de alimentare a consumatorilor.

Calitatea nivelurilor de rezervare specificate, în ceea ce priveşte consumul asigurat şi durata de nealimentare a consumatorilor, în caz de întrerupere simplă, este redată în tabelul 19.1.

D. CATEGORIILE DE RECEPTOARE ALE CONSUMATORILOR. CORELAREA SISTEMULUI INTERN DE ALIMENTARE A CONSUMATORULUI CU INSTALAŢIILE FURNIZORULUI DE ENERGIE ELECTRICĂ

În instalaţiile consumatorilor pot exista patru categorii de receptoare, în funcţie de natura efectelor produse de întreruperea în alimentare cu energie electrică:

— *categoria zero (specială)*, la care întreruperea alimentării poate cauza explozii, incendii, distrugeri de utilaje sau pierderi de vieţi omeneşti;

— *categoria I*, la care întreruperea alimentării produce dereglarea proceselor tehnologice în flux continuu, necesitînd perioade lungi pentru reluarea activităţii la parametrii cantitativi şi calitativi existenţi în momentul întreruperii sau rebuturi importante de materii prime, materiale auxiliare, semifabricate etc.;

— *categoria a II-a*, la care întreruperea alimentării are ca efect nerealizări de producţie, practic numai pe durata întreruperii, iar producţia nerealizată poate fi, de regulă, recuperată;

— *categoria a III-a* cuprinde receptoarele care nu se încadrează în categoriile precedente.

Receptoarele de categoria zero sînt prevăzute cu căi de alimentare independente şi cu surse de intervenţie. Legătura galvanică cu instalaţiile furnizoare de energie electrică are, pentru toate receptoarele de acest gen, ali-

mentări cel puțin duble, atît în instalațiile furnizorului, cît și în cele ale consumatorului de energie electrică. Un exemplu de schemă de acest gen este reprezentat în figura 19.4.

Receptoarele de categoria I dispun de două căi de alimentare independente, racordate în puncte distincte. Căile de alimentare se consideră pînă la ultimul punct de distribuție.

Pentru alimentarea receptoarelor de categoria a II-a se adoptă una sau două căi de alimentare.

Receptoarele de categoria a III-a dispun de o singură cale de alimentare.

O importanță deosebită o reprezintă corelarea instalațiilor de protecție și de automatizare ale consumatorului cu instalațiile furnizorului de energie electrică. De aceea, reglajul instalațiilor de protecție și de automatizare din sistemul intern de alimentare a consumatorului se face de comun acord între furnizor și consumator.

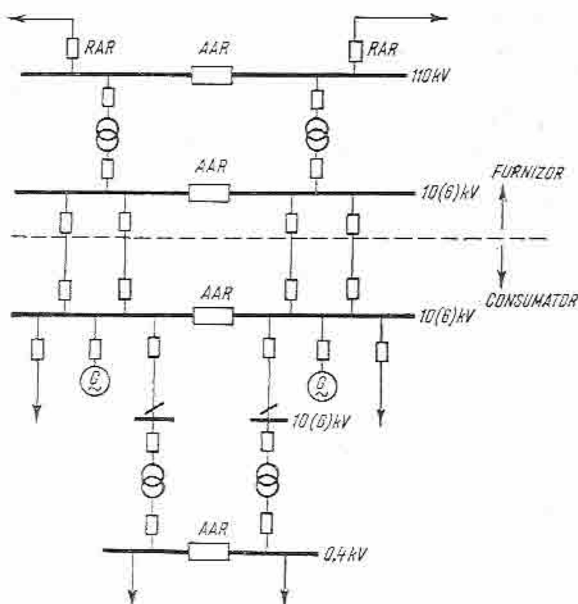


Fig. 19.4. Schema de alimentare a unui consumator de categoria zero:

RAR — reaclanșare automată rapidă; *AAR* — anclanșare automată a rezervei; *G* — generator.

E. GRADUL DE SATISFACERE A ALIMENTĂRII CONSUMATORILOR (Gradul de siguranță). INCIDENTELE DE EXPLOATARE, DERANJAMENTELE ȘI AVARIILE

Gradul de satisfacere a alimentării consumatorilor C, în punctul de delimitare al instalațiilor între furnizor și consumator, este definit de relația:

$$C = \frac{T_e - T_n}{T_e} 100\%, \qquad (19.1)$$

în care:

T_e este intervalul de timp în cadrul unui an calendaristic, în care consumatorul solicită criteriul de siguranță;

T_n — durata probabilă de nealimentare, în perioada considerată.

Acest grad de siguranță se determină din faza de proiectare a instalațiilor de alimentare, urmărindu-i-se în exploatare realizarea și îmbunătățirea lui.

Gradul de siguranță în alimentarea consumatorilor este determinat deci de numărul și de duratele întreruperilor pe care le suportă aceștia, într-o anumită perioadă.

În scopul cunoașterii depline a gradului de siguranță pe care-l conferă instalațiile de alimentare se urmăresc statistic în exploatare nu numai întreruperile cu consecințe la consumatori, ci toate informațiile care pot defini la un moment dat starea tehnică a instalațiilor (duratele reparațiilor, periodicitatea acestora etc.).

Incidente de exploatare, deranjamente și avarii. O importanță deosebită o prezintă, din punctul de vedere al gradului de siguranță, incidentele, deranjamentele și avariile.

Incidentul (noțiune utilizată în instalațiile electrice cu tensiuni mai mari de 1 kV) și *deranjamentul* (noțiune utilizată în instalațiile electrice cu tensiuni sub 1 kV) sînt perturbații care au drept consecință modificarea nedorită a schemei de funcționare.

Avaria este un incident de amploare sau o succesiune de incidente care au loc la un moment dat într-un obiectiv energetic, într-o zonă din sistem sau în sistemul energetic luat în ansamblu și care au drept consecințe deteriorări de echipamente importante sau întreruperi în alimentarea unor platforme industriale sau zone de consum.

Incidentele (cuprinzînd și avariile) se analizează, se înregistrează și se compară prin statistici anuale, cu ajutorul indicilor specifici caracteristici fiecărui gen de instalație. Principalii indici specifici sînt:

— numărul de incidente/100 km de linie electrică aeriană (*LEA*) și an;

— numărul de incidente/100 km de linie electrică subterană (*LES*) și an:

— numărul de incidente/100 de posturi de transformare (*PT*) și an;

— numărul de incidente/100 de stații de transformare (*ST*) și an.

Valorile orientative ale acestor indici specifici ai incidentelor sînt reprezentate în diagramele dinamice din figura 19.5. Dacă acești indici specifici pot fi denumiți sintetici, la baza lor stau de fapt alți indici specifici, din ce în ce mai analitici, de exemplu indici specifici pentru linii electrice aeriene, în funcție de tensiunea nominală a liniilor. Valorile orientative ale acestor indici specifici sînt prezentate în diagramele din figura 19.6.

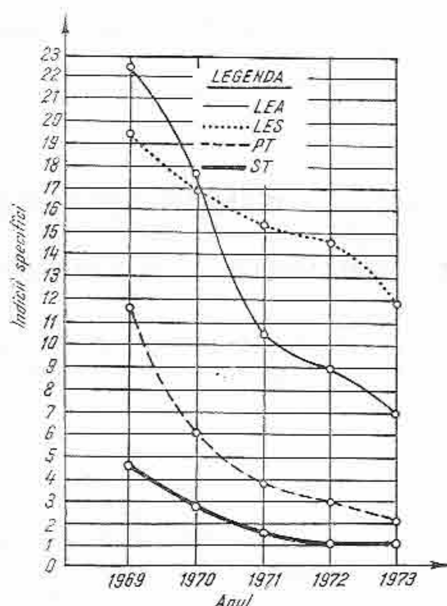


Fig. 19.5. Valori ale indicilor specifici sintetici ai incidentelor în linii electrice aeriene, cabluri, posturi și stații de transformare.

Indicii specifici se adîncesc pînă la element de instalație (izolator, întreruptor, transformator de măsurare etc.) și tip de fabricație, iar aceștia

vor sta la baza determinării statistico-matematice a gradului de siguranţă a instalaţiilor care le conţin ca elemente.

Deranjamentele (caracteristice instalaţiilor de joasă tensiune), din punctul de vedere al indicilor specifici, sînt similare incidentelor, cu deosebirea că raportarea numărului de deranjamente se face la 100 de abonaţi şi an. O evoluţie în timp a indicelui specific al deranjamentelor este redată în figura 19.7.

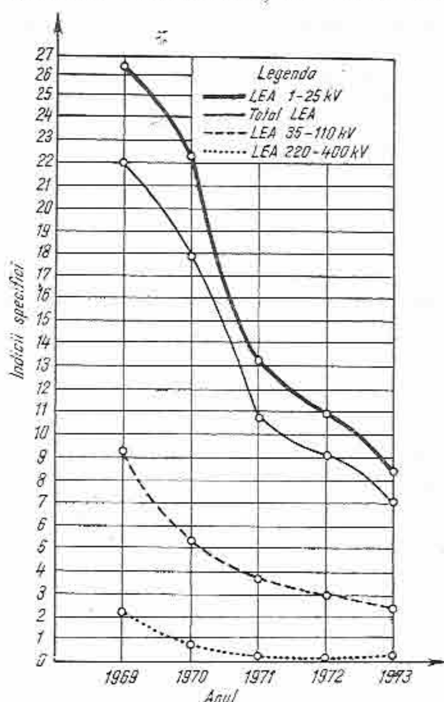


Fig. 19.6. Valori ale indicilor specifici analitici ai incidentelor în liniile electrice aeriene, în funcţie de tensiunea nominală.

1. CARACTERISTICILE INCIDENTELOR

Analiza incidentelor se bazează pe o serie de date care, codificate în mod corespunzător, pot fi prelucrate cu ajutorul calculatoarelor electronice.

Principalele date care caracterizează incidentul sînt: cauza, prilejul, forma de manifestare, durata, energia nelivrabilă şi deteriorările de echipamente, locul.

Cauza incidentului o constituie deficienţa sau fenomenul care provoacă la un moment dat, în anumite condiţii, apariţia acestuia.

Principalele cauze, precum şi ponderea acestora în numărul total de incidente sînt cuprinse în tabelul 19.2.

Prilejul incidentului reprezintă o împrejurare momentană, evidentă şi inevitabilă, în care o anumită cauză provoacă apariţia incidentului. Prilejuri ale incidentelor pot fi: diferite fenomene meteorologice (descărcări atmosferice, vînt, chiciură etc.), poluarea industrială, aruncări de corpuri străine peste instalaţii, manevre de exploatare etc.

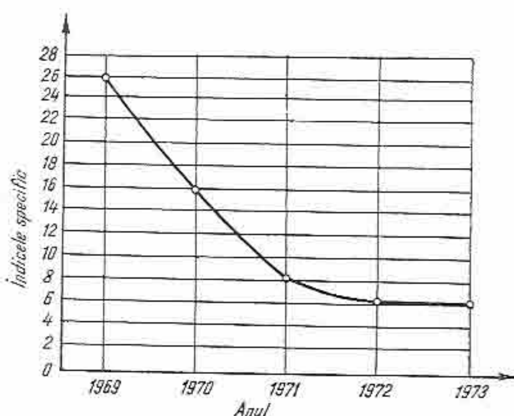


Fig. 19.7. Valori ale indicelui specific al deranjamentelor.

TABELUL 19.2

Ponderea pe cauze a incidentelor

Cauza	Ponderea, în %, în anii		
	1971	1972	1973
Concepția greșită de proiectare	0,17	0,11	0,08
Execuția incorectă a instalațiilor	2,94	2,84	2,49
Echipamente și materiale necorespunzătoare	20,16	21,03	19,60
Exploatarea și întreținerea defectuoasă	4,33	3,14	2,52
Uzura tehnică a materialelor	12,23	11,60	12,74
Depășirea solicitărilor admise	35,64	34,90	36,71
Din cauza instalațiilor consumatorilor	16,98	19,62	21,10
Alte cauze	7,55	6,66	4,76
	100,00	100,00	100,00

Prilejul nu trebuie confundat cu cauza. De exemplu, repartiția pe lunile anului a numărului de incidente prezintă o alură de genul celei reprezentate în figura 19.8. Se observă o creștere a numărului de incidente în lunile de vară, în care instalațiile sînt supuse intens descărcărilor atmosferice. Este însă greșit să se tragă concluzia că toate incidentele se datoresc, în perioada de vară, solicitării materialelor ca urmare a descărcărilor atmosferice. În aceste condiții, descărcările atmosferice constituie prilejul în care se manifestă cauze ca: protecție incorectă la supratensiuni, îmbătrînire prematură a izolației, deficiențe de întreținere etc.

Durata incidentului este intervalul de timp între momentul apariției incidentului și momentul în care consumatorii afectați au fost alimentați din nou.

Deteriorările de echipamente sînt modificările caracteristicilor fizice (electrice, termice, hidraulice sau mecanice) ale echipamentelor, care duc la scoaterea acestuia din funcțiune sau din starea de disponibilitate și trecerea în starea de reparație.

Cauza deteriorării echipamentului o constituie: deficiențele de fabricație, de montaj, de exploatare sau acțiunea unor factori externi, care provoacă, la un moment dat, deteriorarea acestuia. Cauza deteriorării poate sau nu să coincidă cu cauza incidentului.

Locul incidentului este obiectivul, instalația, partea componentă a instalației sau a echipamentului la care s-a produs incidentul.

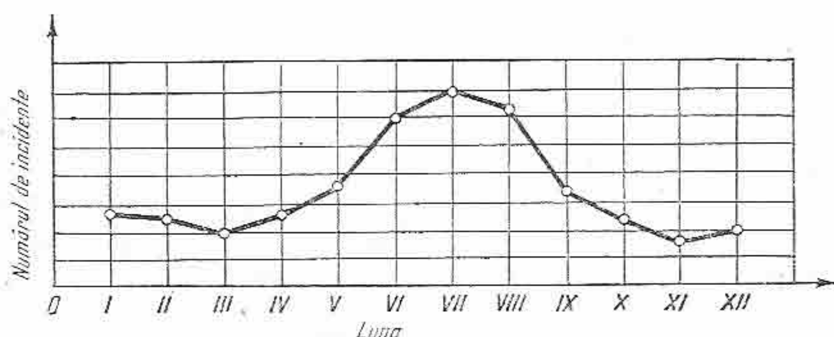


Fig. 19.8. Repartiția pe luni a incidentelor.

2. MĂSURI CE TREBUIE LUATE PENTRU PREVENIREA INCIDENTELOR ȘI A DERANJAMENTELOR

Măsurile ce trebuie luate în urma analizei deranjamentelor și incidentelor sînt în principal următoarele:

— *măsuri de schimbare a actelor normative existente:* de exemplu, în cazul unui act normativ care stabilește zonele meteorologice din țară și condițiile de calcul pentru instalațiile electrice din aceste zone, ca urmare a unor depășiri repetate ale parametrilor inițiali luați în considerare; se pot deci lua măsuri de schimbare a actelor normative și de trecere a unei zone dintr-o categorie meteorologică în alta;

— *măsuri de schimbare a concepției de proiectare și de introducere a unor tehnologii noi*; de exemplu, la liniile electrice aeriene de medie tensiune trecerea de la izolația de gen străpungibil sau greu străpungibil, la izolație nestrăpungibilă, cu alte tipuri de legare a conductoarelor la izolatoare;

— *măsuri de schimbare parțială a părților componente sau de înlocuire totală* în fabricație a unor echipamente;

— *măsuri de îmbunătățire a reviziilor și a reparațiilor*, sub aspectul conținutului lor tehnologic și sub aspectul periodicității lor;

— *măsuri de organizare mai bună a exploatării sau de instruire și perfecționare a lucrătorilor* în anumite domenii deficitare, pentru reducerea duratelor incidentelor și pentru exploatarea corectă a instalațiilor.

REZUMAT

- Controlul calității lucrărilor se execută în toate fazele procesului respectiv: cercetare — proiectare — execuție — final.
- Calitatea energiei electrice este influențată atît de către producător, cît și de consumator.
- În funcție de puterea maximă absorbită sînt normate patru clase de consumatori (A, B, C și D), fiecare avînd cîte trei niveluri de rezervare (1, 2 și 3).
- În funcție de natura efectelor produse de întreruperea în alimentare se deosebesc patru categorii de consumatori (0, 1, 2 și 3).

ÎNTREBĂRI RECAPITULATIVE

1. *Care sînt principalele activități ale sectorului energetic și cum se efectuează controlul calității la diversele niveluri?*
2. *Cum se efectuează controlul de calitate în activitatea de revizii și reparații?*
3. *Cum se prezintă interdependența economică dintre instalațiile furnizorului și cele ale consumatorului de energie electrică sub aspectul parametrilor de calitate ai energiei electrice?*
4. *Cum se grupează consumatorii de energie electrică în funcție de puterea maximă și de nivelurile de rezervare?*
5. *Care sînt categoriile de consumatori din punctul de vedere al efectelor produse de întreruperea în alimentare cu energie electrică?*
6. *Ce reprezintă: incidentele, deranjamentele și avariile și cum se analizează?*

C A P I T O L U L 20

METODE STATISTICO-MATEMATICE PENTRU DETERMINAREA GRADULUI DE SIGURANȚĂ

Analiza gradului de siguranță (a fiabilității) unui sistem energetic sau al unui element component presupune, în fond, următoarele:

— existența unei urmăriri statistice a tuturor evenimentelor cu care se confruntă sistemul sau elementul respectiv (funcționare normală, reparație planificată, stare de rezervă, număr de avarii și durate de remedieri etc.);

— încadrarea acestor evenimente într-un sistem matematic de prognoză;

— verificarea statistică în timp a elementelor calculate.

Apare deci necesară o îmbinare între experiența ce se acumulează în date statistice și calculul matematic al evenimentelor respective.

A. METODA STATISTICĂ DE TRATARE A INFORMAȚIILOR PRIVIND AVARIILE, INCIDENTELE, DETERIORĂRILE DE ECHIPAMENTE, ÎNTRERUPERILE ÎN ALIMENTAREA CONSUMATORILOR ȘI REPARAȚIILE PLANIFICATE ȘI NEPLANIFICATE

Primul element care trebuie cunoscut este situația statistică, pe o perioadă cît mai lungă, a diferitelor stări prin care trece un sistem energetic sau un element al acestuia.

În acest scop este absolut necesară existența unui sistem informațional, științific organizat, care să asigure în timp o continuitate a informației și care să utilizeze sistemele electronice de calcul în stocarea și prelucrarea informațiilor. Acesta este, în țara noastră, sistemul informațional „GETIC" (Gestiunea Tehnică a Instalațiilor și Consumatorilor).

Sistemul GETIC reprezintă un sistem integrat de tratare a informațiilor privind comportarea în funcționare a instalațiilor din dotarea sistemului electroenergetic național. El furnizează informații referitoare la avarii și incidente, corelate cu informațiile referitoare la efectele acestora asupra instalațiilor (deteriorări) și consumatorilor (limitări, întreruperi în alimentare) și cu informațiile referitoare la modul în care sînt reparate planificat sau neplanificat instalațiile.

Sistemul GETIC, în conformitate cu scopul urmărit, reunește patru subsisteme informative:

— subsistemul IAVIC — Gestiunea Incidentelor, Avariilor și Întreruperilor Accidentale a Consumatorilor;
— subsistemul DEREN — Gestiunea Deteriorărilor de Echipamente și a Reparațiilor Neplanificate;
— subsistemul REPLA — Gestiunea Reparațiilor Planificate;
— subsistemul INVIC — Gestiunea mișcărilor din Inventarul Instalațiilor și al Consumatorilor.

În figura 20.1 sînt reprezentate principalele relații dintre aceste subsisteme.

Fiecare subsistem informatic își colectează informațiile primare pe documente separate. Tipul, structura și volumul informațiilor primare colectate de fiecare subsistem în parte sînt stabilite în raport cu necesitățile proprii: pentru fiecare eveniment (incident sau avarie) se colectează și se transmit numai informațiile strict legate de desfășurarea evenimentului, celelalte informații necesare analizei fiind preluate din alte subsisteme informaționale ale sistemului GETIC. În acest mod se evită colectarea în paralel a informațiilor comune mai multor subsisteme și se poate realiza o regrupare a informațiilor care să asigure o utilizare judicioasă de către fiecare subsistem în parte a fondului de informații.

Prin prelucrarea automată a datelor se pun la dispoziție toate informațiile necesare efectuării analizelor.

La analiza gradului de siguranță al unui sistem energetic sau element component al acestuia concură întregul sistem informațional GETIC, și în special subsistemele IAVIC și DEREN.

Subsistemul IAVIC pune la dispoziție următoarele tipuri de informații:

— indici de avariere calculați pe categorii de ansambluri și subansambluri;

— situația incidentelor și a avariilor pe ansambluri și subansambluri individualizate;

— situația incidentelor și a avariilor pe categorii de ansambluri și subansambluri;

— situația întreruperilor în alimentarea marilor consumatori, individualizați și pe categorii de consumatori;

— intensitatea d și coeficientul de avariere q pe ansambluri și subansambluri individualizate;

— istoriograme pe ansambluri și subansambluri individualizate (durate de funcționare, de ținere în rezervă, reparații planificate, indisponibilități determinate de incidente și avarii);

— analize privind avariile extinse pe sistem (zonă).

Subsistemul DEREN furnizează informații pentru:

— situații privind deteriorările de echipamente și reparațiile neplanificate pe tipuri de ansambluri și subansambluri;

— situații pe ansambluri (linii, stații, centrale) și subansambluri (transformatoare, întreruptoare, separatoare, cazane, turbine-generatoare, motoare, pompe etc.) individualizate, privind deteriorările de echipamente și reparațiile neplanificate într-o perioadă de timp;

— indici de deteriorare calculați pe tipuri de ansambluri;

— elemente statistice pentru stabilirea stocurilor de securitate.

B. REPREZENTAREA MATEMATICĂ A GRADULUI DE SIGURANȚĂ

Studiul siguranței în funcționare a unei instalații sau element component începe de la o cunoaștere aprofundată a realității, a procesului ce se desfășoară și a funcțiilor pe care instalația sau elementul respectiv le are de îndeplinit.

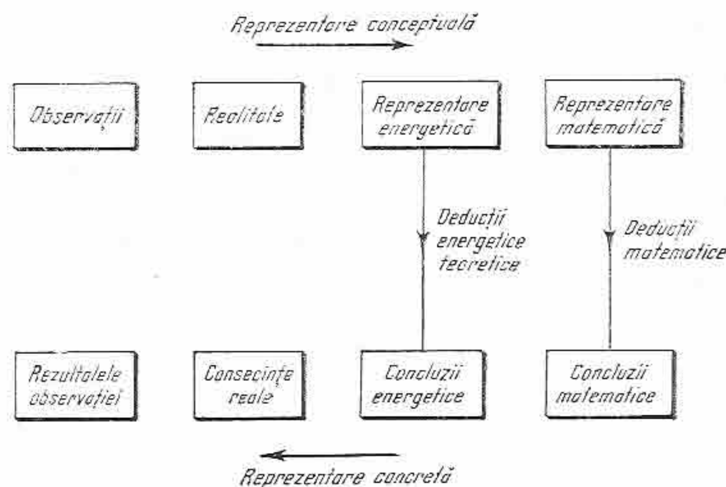


Fig. 20.2. Relația între reprezentarea conceptuală și reprezentarea concretă.

Reprezentarea conceptuală a fenomenului se realizează în două etape:
— prin concepte energetice, bazate în mod larg pe intuiție;
— prin concepte matematice, obținute exclusiv prin abstractizare.

Scopul acestor prezentări este de a se obține, prin intermediul unui lanț de deducții logice, unele concluzii teoretice cu referire la fenomenul energetic studiat.

Considerîndu-se concluziile teoretice, dar și rezultatele observației realității, se pot obține concluzii cu referire la consecințele reale. Figura 20.2 prezintă schematic cele expuse.

1. SCHEME ȘI ELEMENTE

Schemele, mai mult sau mai puțin detaliate, urmăresc reprezentarea conceptuală a fenomenului fizic.

O analiză a acestor scheme va arăta că în ele apar explicit, pentru reprezentarea unui același proces, mai multe sau mai puține elemente, în funcție de scopul urmărit. Astfel, de exemplu, la analiza funcționării unui cazan apar, în detaliu, în afara cazanului propriu-zis, vane, ventile, conducte, pompe, ventilatoare etc. Același cazan, la analiza funcționării unui bloc turbogenerator, este adesea considerat ca un singur element (echivalent).

Un exemplu asemănător îl poate constitui un întreruptor care este reprezentat fie prin multiplele elemente componente (dacă obiectul studiului este fiabilitatea întreruptorului), fie ca element unic (în cazul studiului schemelor stațiilor de conexiuni, ale sistemelor de alimentare ale consumatorilor etc.).

Elementele sînt dispozitive considerate entitate primară (indivizibile), într-un calcul de fiabilitate.

2. ELEMENTE ÎN SERIE SAU ÎN PARALEL

Independent de conținutul „energetic", totalitatea elementelor unui complex, din punctul de vedere al studiului siguranței în funcționare, sînt conectate în „serie" sau în „paralel". De exemplu:

— cazanul — turbina — generatorul — transformatorul — întreruptorul unui bloc turbogenerator reprezintă o conectare în serie a mai multor elemente enumerate, ieșirea din funcțiune a unui singur element ducînd la întreruperea funcționării întregului complex;

— o bară colectoare cu separatoarele de bare ale plecărilor și descărcătoarelor legate la bară constituie, de asemenea, o conectare serie din punctul de vedere al studiului siguranței în funcționare;

— cele două electropompe de alimentare ale cazanului, care se pot rezerva reciproc, constituie două elemente în paralel;

— mai multe blocuri turbogeneratoare conectate la o aceeași bară colectoare constituie elemente în paralel în raport cu bara, ieșirea din funcțiune a unui element dintr-o serie reprezentînd blocul, neavînd repercusiuni asupra funcționării ansamblului;

— bara colectoare, a cărei ieșire din funcțiune determină oprirea tuturor blocurilor care debitează pe ea, constituie un element în serie cu fiecare bloc turbogenerator în parte etc.

Așadar, elementele serie sînt elemente a căror funcționare încetează la nefuncționarea unuia dintre ele, iar elementele paralele, acele elemente a căror funcționare nu este reciproc condiționată, la defectarea unuia dintre ele, circuitul (complexul) din care fac parte continuînd să funcționeze la plină capacitate sau cu capacitate parțială (în funcție de gradul de rezervare al instalației).

Reprezentarea energetică cuprinde elemente conectate în serie sau în paralel, funcțional dependent sau independent.

Elementele componente ale unei instalații pot fi reparabile — adică pot fi readuse prin acțiunea personalului la starea de dinaintea apariției unor defecțiuni — sau nereparabile, în care caz, după defectare, ele trebuie înlocuite (de exemplu, unele relee tranzistorizate etc.).

3. PRINCIPALII INDICATORI DE SIGURANȚĂ

Observarea comportării în timp a unui element reparabil permite cunoașterea acestuia pentru un interval de timp calendaristic T determinat (fig. 20.3). Se folosesc următoarele notații:

T_p — intervalul de timp în care elementul era prevăzut să funcționeze;
T_f — intervalul de timp în care elementul a funcționat;
T_d — intervalul de timp în care elementul a fost oprit forțat;
T_{rep} — intervalul de timp prevăzut pentru reparații planificate;

T_{rez} — intervalul de timp în care elementul era prevăzut să fie în rezervă rece;
T_F — intervalul total de timp în care elementul a funcționat;
N — numărul de defectări (opriri forțate);
T_D — intervalul total de timp în care elementul a fost oprit forțat.

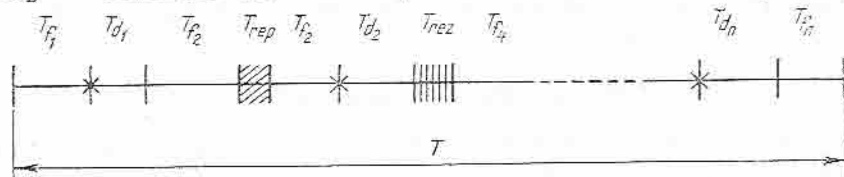


Fig. 20.3. Componentele de timp ale unui element reparabil.

Între notațiile expuse mai sus există următoarele relații matematice:

$$T = T_p + T_{rep} + T_{rez}; \qquad (20.1)$$

$$T_F = \sum_1^i T_f; \qquad (20.2)$$

$$T_D = \sum_1^i T_d. \qquad (20.3)$$

Cu aceste elemente se pot determina principalii indicatori de siguranță:

— *coeficientul de avariere*, raportul dintre durata totală de refuz a unui dispozitiv (în care elementul a fost oprit forțat) și durata de funcționare planificată:

$$q = \frac{T_D}{T_p} \, [\%]; \qquad (20.4)$$

— *intensitatea de avariere*, densitatea probabilității condiționate ca dispozitivul aflat în stare de succes (funcționare) la momentul t să treacă în stare de refuz (defect) în intervalul $(t, t + dt)$:

$$\hat{\lambda} = \frac{N}{T_F} = \frac{1}{\hat{T}_f} \, [s^{-1}], \qquad (20.5)$$

în care $\hat{T}_f$ este durata medie de funcționare între două opriri forțate;

— *intensitatea de reparare*, densitatea probabilității condiționate ca elementul aflat în stare de refuz (defect) la momentul t să treacă în stare de succes (funcționare), în intervalul $(t, t + dt)$:

$$\hat{\mu} = \frac{N}{T_D} = \frac{1}{\hat{T}_d} \, [s^{-1}], \qquad (20.6)$$

în care $\hat{T}_d$ este durata medie a unei opriri forțate.

Coeficienții $\hat{\lambda}$ și $\hat{\mu}$ au caracterul unor frecvențe medii ale avariilor, respectiv al reparațiilor.

Coeficientul de avariere q are un conținut de informații mai redus decît λ și μ. Relația dintre aceste mărimi este pentru perioade de observație foarte lungi $(t \to \infty)$:

$$q = \frac{\hat{T}_d}{\hat{T}_f + \hat{T}_d} \, [\%]. \qquad (20.7)$$

Se poate deci constata că valoarea coeficientului de avariere depinde atît de calitatea echipamentului, care determină durata medie de funcționare

fără defect ($\widehat{T}_f$), cît și de modul de organizare a reparațiilor, care determină durata medie de rămînere în defect ($\widehat{T}_d$).

Aceleași date obținute prin observația statistică și prezentate în figura 20.4 permit trasarea curbelor de repartiție a duratelor de funcționare, respectiv de defectare.

Astfel, spre exemplu, dacă pentru un element observat s-au constatat într-un interval de observație dat:

n_1 — defecțiuni cu durata t_1;
n_2 — defecțiuni cu durata t_2;
⋮
n_m— defecțiuni cu durata t_m,

unde $t_1 < t_2 < \ldots < t_m$, considerîndu-se $n_m = \sum_1^m n_i = 100\%$, se poate trasa o curbă (fig. 20.4), care să permită determinarea probabilității de a avea întrerupere cu o durată mai mică sau cel mult egală cu o durată dată.

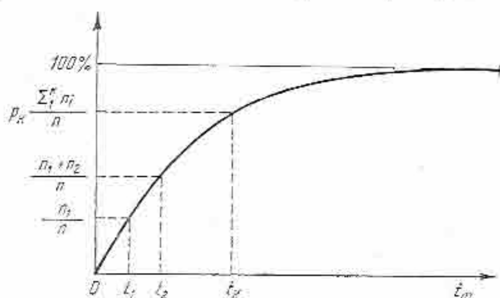


Fig. 20.4. Determinarea curbei probabilitate-durată.

În figura 20.5 sînt reprezentate curbele de distribuție a duratelor de reparații după defect obținute pe baza datelor statistice pentru diferite aparate de 110 kV.

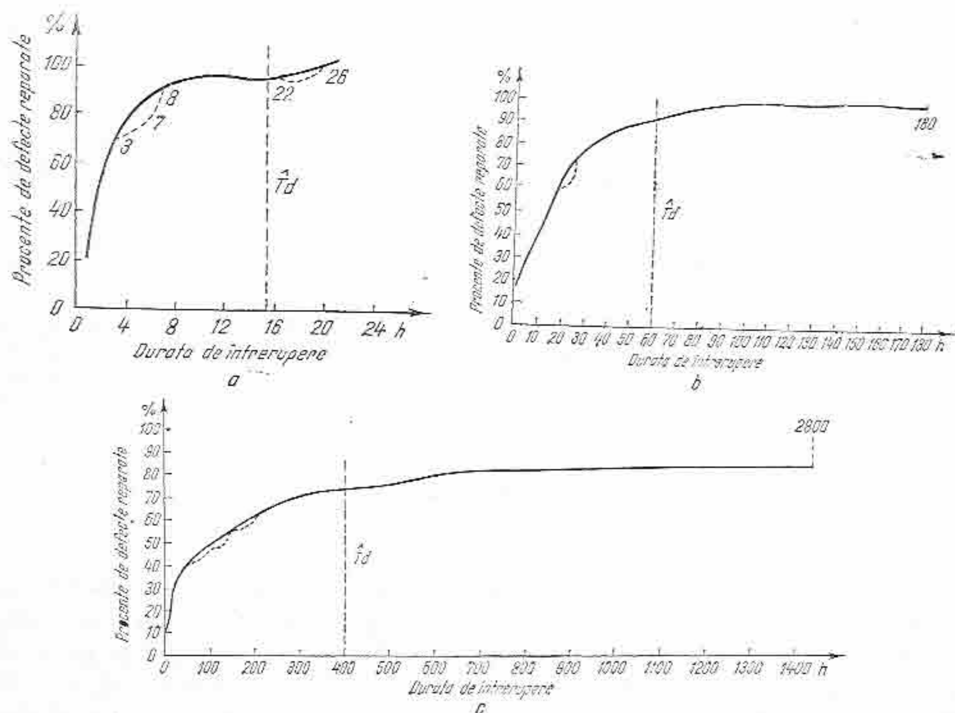


Fig. 20.5. Curbe probabilitate-durată:
a — separator 110 kV; *b* — întreruptor tip IUP 110 kV; *c* — transformator de putere 110 kV.

4. STAREA DE SUCCES ŞI STAREA DE REFUZ

Starea de succes este starea în care sînt îndeplinite condiţiile de funcţionare impuse sistemului sau elementului considerat.

Starea de refuz este starea în care nu sînt îndeplinite condiţiile de funcţionare impuse sistemului sau elementului considerat.

Reprezentarea energetică permite să se stabilească condiţiile care trebuie îndeplinite pentru realizarea stării de succes (respectiv situaţiile ce conduc la stare de refuz). Concluziile matematice, împreună cu concluziile energetice, vor permite o interpretare completă şi stabilirea gradului de fiabilitate proiectat al instalaţiei.

Un aspect important al alegerii modelului matematic îl constituie modul de considerare a elementelor care alcătuiesc complexul: ca elemente *independente* sau *dependente*.

Uneori, pentru simplificarea calculelor şi în cazul unor anumite valori ale parametrilor, modelul matematic corespunde unor elemente independente, deşi fizic elementele complexului sînt funcţional dependente.

Adesea pentru determinarea *deficienţei* (gradul de neacoperire a consumului), centralele unui sistem energetic sînt reprezentate ca elemente independente, debitînd pe o bară unică la care se află întregul consum, deşi fizic puterea (şi energia) acestor centrale ajunge la consumatori prin reţeaua de transport (elemente-serie).

Reţeaua de alimentare a unui consumator industrial este de regulă tratată ca o conexiune alcătuită din elemente dependente, aşa cum este şi fizic, dar ea poate fi considerată şi ca alcătuită din elemente independente.

Se poate constata că modelarea matematică, considerîndu-se elementele independente, este acoperitoare. Prin această modelare se consideră că orice element se poate opri forţat, independent de starea celorlalte (deci şi în perioadele în care celelalte elemente nu funcţionează, deoarece un element oarecare al seriei este oprit forţat).

Abaterile obţinute pentru probabilitatea stării de succes (sau refuz) între cele două moduri de modelare depind de parametrii de fiabilitate ai schemelor. De exemplu, dacă într-un circuit format dintr-un separator, întreruptor-separator, linie-transformator, întreruptor şi separator, fiabilitatea transformatorului este redusă (o avarie la 3 ani, durata de reparare — 6 luni), valorile obţinute pentru probabilitatea stării de succes pot fi mai mici cu 10—17%.

5. METODA BINOMIALĂ

Modelarea matematică prin considerarea elementelor independente — aşa-numita metodă binomială — care, cu aplicaţie la sistemul energetic, este cunoscută sub denumirea de metoda Calabrese, are avantajul că necesită o informaţie mai redusă (cunoaşterea coeficientului de avariere q), dar la rîndul ei dă informaţii numai cu referire la probabilitatea realizării diferitelor situaţii de refuz a diferitelor niveluri de indisponibilitate.

Metoda binomială, cea mai simplă metodă de estimare a siguranței în funcționare, are la bază următoarele ipoteze de calcul:

— evenimentele se consideră independente;

— caracterizarea siguranței în funcționare se face prin coeficientul de avariere q și valoarea complementară a acestuia.

Se obțin ca rezultate probabilitățile de avariere simultană de elemente dintr-un complex alcătuit din n elemente.

Pentru exemplificare (tabelul 20.1) se consideră trei elemente. Fiecare dintre acestea se află în stare de funcționare (succes), cu probabilitatea p_i, și în stare de nefuncționare (refuz), cu probabilitatea q_i.

TABELUL 20.1

Exemplu de probabilitate a fiecărei stări prin care poate trece un grup de trei elemente

p_1	p_2	p_3	p_1	p_2	p_3	Funcționează 1, 2, 3
		q_3	p_1	p_2	q_3	Funcționează 1, 2 Nu funcționează 3
	q_2	p_3	p_1	q_2	p_3	Funcționează 1, 3 Nu funcționează 2
		q_3	p_1	q_2	q_3	Funcționează 1 Nu funcționează 2 și 3
q_1	p_2	p_3	q_1	p_2	p_3	Funcționează 2 și 3 Nu funcționează 1
		q_3	q_1	p_2	q_3	Funcționează 2 Nu funcționează 1 și 3
	q_2	p_3	q_1	q_2	p_3	Funcționează 3 Nu funcționează 1 și 2
		q_3	q_1	q_2	q_3	Nu funcționează 1, 2, 3
			1,00000			

Cei doi coeficienți p și q se află în relație matematică:

$$p_i + q_i = 1. \tag{20.8}$$

Se poate constata că, dacă cele trei elemente ar fi identice ($p_1 = p_2 = p_3$, respectiv $q_1 = q_2 = q_3$), s-ar obține:

— probabilitatea de funcționare a celor trei grupuri $= p^3$;

— probabilitatea de funcționare a celor două grupuri $= 3\ p^2q$;

— probabilitatea de funcționare a unui singur grup $= 3\ pq^2$;

— probabilitatea de funcționare a nici unui grup $= q^3$,

adică termenii corespunzători:

$$(p + q)^3 = p^3 + 3p^2q + 2pq^2 + q^3. \tag{20.9}$$

Extinzîndu-și raționamentul pentru n grupuri identice $(p + q)^n$, probabilitatea de a avea toate grupurile în funcțiune este p^n, iar probabilitatea de a avea k grupuri defecte este:

$$C_n^k p^{n-k} q^k. \tag{20.10}$$

6. EXEMPLU DE CALCUL

Să se determine probabilitățile de stare ale elementelor componente aferente instalațiilor următoare:

a) **La un racord adînc de 110 kV**, format din elementele componente din figura 20.6 și următoarele probabilități de insucces a elementelor componente:

	$q \cdot 10^{-4}$
— separator	0,21
— întreruptor	1,865
— LEA simplu circuit 3 km	0,57
— transformator 110/6 kV	95,99

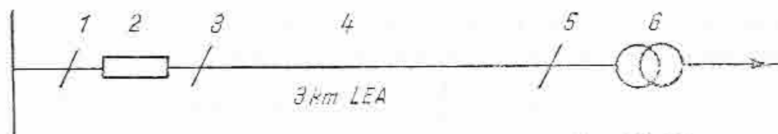


Fig. 20.6. Schema electrică a unui racord adînc 110 kV:
1, 3, 5 — separatoare; 2 — întreruptor; 4 — LEA (3 km); 6 — transformator.

probabilitatea de succes va fi:

$$p = \pi_1^6 p_i = (1 - 0{,}000021) \times (1 - 0{,}0001865) \times (1 - 0{,}000021) \times (1 - 0{,}000057) \times$$
$$\times (1 - 0{,}000021) \times (1 - 0{,}009599) = 0{,}999979 \times 0{,}9998135 \times 0{,}999979 \times 0{,}999943 \times$$
$$\times 0{,}999979 \times 0{,}990401 = 0{,}990097,$$

iar *probabilitatea de defect* va fi:

$$q = 1 - 0{,}990097 = 0{,}009903.$$

Pentru 1 an (8 760 h), *timpul mediu în care va funcționa instalația* va fi de:

$$8\,760 \times 0{,}990097 = 8\,673{,}25 \text{ h/an},$$

iar *timpul mediu probabil de nefuncționare* va fi:

$$8\,760 \times 0{,}009903 = 86{,}75 \text{ h/an}.$$

b) **Pentru două racorduri adînci de 110 kV** identice cu cel de mai sus, care alimentează același consumator:

$$(p + q)^2 = p^2 + 2\,pq + q^2, \qquad (20.11)$$

probabilitatea de a funcționa amîndouă va fi:

$$p^2 = 0{,}990097^2 = 0{,}980292,$$

probabilitatea de a funcționa un singur racord va fi:

$$2pq = 2 \times 0{,}990097 \times 0{,}009903 = 0{,}019610,$$

iar *probabilitatea de a nu funcționa, nici unul:*

$$q^2 = 0{,}009903^2 = 0{,}000098.$$

Se verifică:

$$0{,}980292 + 0{,}019610 + 0{,}000098 = 1.$$

Considerîndu-se că fiecare racord adînc poate asigura singur integral alimentarea consumatorului, *probabilitatea de succes* va fi:

$$p^2 + 2pq = 0{,}980292 + 0{,}019610 = 0{,}999902,$$

din care rezultă un *timp mediu de funcționare* pe an de:

$$8\,760 \times 0{,}999902 = 8\,759{,}14 \text{ h/an}$$

și, respectiv, un *timp mediu de refuz* (de nefuncționare) de:

$$8\,760 \times 0{,}000018 = 0{,}157 \text{ h/an.}$$

Se constată astfel efectul pozitiv al introducerii rezervei în alimentare.

REZUMAT

- Analiza fiabilității unui sistem energetic sau a unui element component presupune:
  - existența unei urmăriri statistice a tuturor evenimentelor produse în sistem;
  - încadrarea acestor evenimente într-un sistem matematic de prognoză;
  - verificarea statistică în timp a elementelor calculate.
- În scopul urmăririi statistice a evenimentelor în țara noastră se folosește sistemul informațional GETIC (Gestiunea Tehnică a Instalațiilor și Consumatorilor), avînd patru subsisteme: IAVIC, DEREN, REPLA și INVIC.

ÎNTREBĂRI RECAPITULATIVE

1. *Care sînt informațiile furnizate de fiecare dintre subsistemele sistemului informațional GETIC?*
2. *Ce reprezintă elementele în serie sau în paralel din punctul de vedere al studiului fiabilității sistemului?*
3. *Care sînt principalii indicatori de siguranță, precum și relațiile lor matematice de definire?*
4. *Ce reprezintă „starea de succes" și „starea de refuz" și care sînt condițiile pentru îndeplinirea acestora?*
5. *În ce constă metoda binomială de estimare a siguranței în funcționare a unui sistem energetic?*

CONTROLUL CALITĂŢII LUCRĂRILOR LA MONTAJ, PUNEREA ÎN FUNCŢIUNE ŞI DAREA ÎN EXPLOATARE A INSTALAŢIILOR ELECTROENERGETICE

Controlul calităţii se efectuează pe baza unor acte normative de verificări, încercări şi probe privind montajul, punerea în funcţiune şi darea în exploatare a instalaţiilor energetice, care stabileşte atît nomenclatorul de probe şi încercări, cît şi delimitarea responsabilităţilor între executant şi beneficiar.

În desfăşurarea procesului de realizare a instalaţiilor electroenergetice se deosebesc trei perioade tehnologice distincte:

— perioada de pregătire şi de executare a montajului, în care se execută verificările, încercările şi probele mecanice şi electrice, inclusiv rodajul individual şi în subansambluri a instalaţiilor, cu scopul de a se asigura verificarea calităţii montajului pe parcurs şi de a se asigura rodajul pieselor şi al organelor în mişcare;

— perioada de punere în funcţiune şi de exploatare de probă (de 72 h), în care se execută rodajul şi probele tehnologice asupra întregului ansamblu de instalaţii, cu scopul de a se verifica şi a se regla funcţionarea în ansamblu a instalaţiilor;

— perioada de exploatare continuă în perioada de garanţie, în scopul de a se stabili caracteristicile şi regimurile de funcţionare ale instalaţiilor, precum şi indicii tehnico-economici principali, în vederea realizării valorilor prevăzute în proiect.

În cele ce urmează se prezintă probele obligatorii pentru cîteva elemente, ştiindu-se însă că şi restul de instalaţii au prevăzute, de asemenea, norme de verificări şi încercări, corespunzătoare celor trei perioade mai sus definite.

Rezultatele tuturor măsurărilor trebuie să corespundă cu datele de fabricaţie sau cu prescripţiile prevăzute în „Normativul de încercări la echipamente şi instalaţii electrice PE 116/73".

A. CONTROLUL CALITĂŢII LUCRĂRILOR LA TRANSFORMATOARE ŞI AUTOTRANSFORMATOARE DE PUTERE

1. PROBE ÎN PERIOADA DE MONTAJ

a) Probe de ulei.

b) Măsurarea rezistenţei de izolaţie a şuruburilor de strîngere accesibile, în cazul în care se scoate miezul.

c) Verificarea releului de gaze şi a înclinării conductei de legătură între transformator şi conservator, precum şi a înclinării transformatorului.

d) Proba instalaţiei de răcire a transformatorului.

e) Proba funcţionării comenzilor şi a semnalizărilor ventilatoarelor, pompelor etc.

f) Proba funcţionării blocajelor şi a schemelor de automatizare.

g) Proba etanşeităţii.

h) Verificarea instalaţiei de măsurare a temperaturii transformatorului.

i) Verificarea legăturii de punere la pămînt a cuvei transformatorului.

j) Probe pentru determinarea umidităţii izolaţiei transformatorului (rezistenţa de izolaţie, coeficientul de absorbţie, tgδ).

k) Măsurarea rezistenţelor ohmice a înfăşurărilor pe fiecare plot al comutatorului.

l) Proba pentru determinarea raportului de transformare.

m) Proba pentru determinarea grupei de conexiuni.

n) Verificarea corespondenţei fazelor între transformator şi restul instalaţiei.

o) Proba comenzilor şi a blocajelor pentru toate întreruptoarele şi separatoarele aferente transformatorului.

p) Verificarea acţionării elementelor de protecţie asupra întreruptoarelor şi semnalizărilor respective.

r) Verificarea funcţionării comutatorului de ploturi şi a circuitelor aferente.

2. PROBE ÎN PERIOADA DE PUNERE ÎN FUNCŢIUNE

a) Probe funcţionale ale comenzilor şi ale blocajelor pentru toate întreruptoarele şi separatoarele aferente transformatorului.

b) Verificarea acţionării elementelor de protecţie asupra întreruptoarelor şi semnalizărilor respective.

c) Verificarea funcţionării instalaţiei de răcire (ventilatoare, pompa de ulei etc.).

d) Verificarea funcţionării comutatorului de ploturi şi a circuitelor aferente.

e) Verificarea pe viu a protecţiilor la transformatoare-bloc cu generatorul.

f) Conectarea transformatorului la tensiunea nominală timp de 30 min şi efectuarea a trei pînă la cinci conectări şi deconectări pentru verificarea comportării.

g) Verificarea indicaţiilor instrumentelor de măsurare şi ridicarea diagramelor fazoriale (vectoriale) pentru protecţiile care necesită acest lucru.

h) Măsurarea curentului de mers în gol şi a pierderilor în sarcină (dacă se cere în mod special).

i) Efectuarea încercării izolaţiei cu tensiune mărită (dacă este posibil).

j) Proba complexă.

3. PROBE ÎN PERIOADA DE EXPLOATARE CONTINUĂ

Se urmăreşte comportarea în exploatare.

B. CONTROLUL CALITĂŢII LUCRĂRILOR LA LINIILE ELECTRICE AERIENE

1. PROBE ÎN PERIOADA DE MONTAJ

a) Verificarea calităţii betoanelor de fundaţii prin probe conform normativelor în vigoare.

b) Măsurarea rezistenţei de legare la pămînt a stîlpilor, cu conductorul de protecţie deconectat.

c) Verificarea distanţelor dintre conductoarele liniilor aeriene şi obiectele învecinate la toate trecerile şi intersecţiile.

d) Verificarea legăturilor electrice dintre conductorul de protecţie şi prizele de pămînt.

e) Verificarea săgeţii conductoarelor.

f) Verificarea secvenţei (succesiunii) fazelor pe întreaga linie.

g) Verificarea transfazărilor (ca loc şi distanţe).

h) Verificarea inscripţiilor de pe stîlpi privind identificarea lor şi protecţia muncii.

i) Măsurarea rezistenţei prizelor de pămînt.

j) Verificarea mijloacelor de protecţie împotriva supratensiunilor atmosferice la ieşirile liniilor din staţii, în punctele de intersecţii cu alte linii aeriene şi la posturile de transformare.

k) Verificarea traseului şi a culoarului liniei.

l) Proba cu tensiune a liniei.

m) Proba comenzilor, a semnalizărilor şi a blocajelor întreruptoarelor şi separatoarelor.

2. PROBE ÎN PERIOADA DE PUNERE ÎN FUNCŢIUNE

a) Proba funcţională a comenzilor, a semnalizărilor şi a blocajelor întreruptoarelor şi separatoarelor.

b) Proba de coordonare a funcţionării protecţiilor cu dispozitivul de *RAR*.

c) Ridicarea diagramelor fazoriale pentru protecţiile respective şi urmărirea indicaţiilor instrumentelor de măsurare.

d) Proba complexă a liniei (se măsoară curentul capacitiv, puterea reactivă, tensiunile la ambele capete şi influenţele liniei asupra liniilor de telecomunicaţii învecinate);

e) Măsurarea parametrilor electrici şi ridicarea imaginii iniţiale a liniei la linii cu tensiuni de peste 220 kV inclusiv sau acolo unde se cere în mod special.

3. PROBE ÎN PERIOADA DE EXPLOATARE CONTINUĂ

Se verifică comportarea liniei în timpul exploatării.

C. CONTROLUL CALITĂȚII LUCRĂRILOR LA LINII ELECTRICE ÎN CABLU SUBTERAN

1. PROBE ÎN PERIOADA DE MONTAJ

a) Verificarea traseului cablului și a amenajării acestuia.

b) Măsurarea rezistenței de izolație a cablului.

c) Proba comenzilor, a semnalizărilor și a blocajelor întreruptoarelor și separatoarelor.

2. PROBE ÎN PERIOADA DE PUNERE ÎN FUNCȚIUNE

a) Proba funcțională a comenzilor, a semnalizărilor și a blocajelor întreruptoarelor și separatoarelor.

b) Proba protecțiilor.

c) Ridicarea diagramelor fazoriale pentru protecțiile respective și urmărirea indicațiilor instrumentelor de măsurare.

d) Proba complexă a cablurilor. Se măsoară curentul capacitiv, puterea reactivă și tensiunea la ambele capete.

e) Măsurarea parametrilor electrici și ridicarea imaginii inițiale a cablului la cabluri cu tensiuni de peste 20 kV.

3. PROBE ÎN PERIOADA DE EXPLOATARE CONTINUĂ

Se urmărește comportarea cablului în timpul exploatării.

D. MĂSURAREA REZISTENȚELOR OHMICE ALE DIVERSELOR ELEMENTE CONSTRUCTIVE DIN INSTALAȚII

Măsurarea se efectuează prin metoda ampermetrului și a voltmetrului sau prin intermediul punții simple sau duble. Măsurarea are drept scop depistarea eventualelor defecte de continuitate, precum și respectarea anumitor valori ale rezistențelor electrice. Acestea ar fi pe scurt încercările principale ce se efectuează asupra majorității aparatelor, echipamentelor și instalațiilor electrice, cum ar fi: generatoare, compensatoare sincrone, transformatoare, motoare asincrone, întreruptoare, separatoare, bobine de stingere etc. La unele aparate, cum ar fi transformatoarele, bobinele de compensare, autotransformatoarele, bobinele de stingere, izolatoarele etc. se măsoară tangenta unghiului de pierderi în dielectric (tgδ).

Tangenta unghiului de pierderi poate fi determinată cu ajutorul unor montaje în punte, folosindu-se surse de curent alternativ.

La transformatoare tg δ trebuie să nu depășească cu mai mult de 30% valoarea de fabricație.

Valorile orientative pentru tgδ (în %) în funcţie de temperatură sînt date în tabelul 21.1.

TABELUL 21.1

Valori orientative pentru tg δ în funcţie de temperatură

Caracteristicile transformatorului		Temperatura izolaţiei °C						
U_{nom}, kV	S_{nom}, MVA	10	20	30	40	50	60	70
35	2,5	1,5	2	2,6	3,4	4,6	6	8
35	10	1,2	1,5	2	2,6	3,4	4,5	6
35	10	0,8	1	1,3	1,7	2,3	3	4

E. MĂSURAREA CAPACITĂŢII TRANSFORMATORULUI LA DOUĂ TEMPERATURI DIFERITE

În scopul determinării gradului de umezire a înfăşurărilor se execută măsurări ale capacităţii dielectricilor neomogeni care apar în izolaţie atunci cînd acesta prezintă un anumit grad de umezire.

Prin intermediul unei punţi de curent alternativ se determină capacitatea dielectricului la 70 °C şi la frecvenţa de 50 Hz şi capacitatea dielectricului la 20 °C şi la aceeaşi frecvenţă.

Raportul $\frac{C_{70}}{C_{20}}$ trebuie să fie mai mic decît 1,3.

F. MĂSURAREA CURENTULUI DE MERS ÎN GOL ŞI A PIERDERILOR DE MERS ÎN GOL

Măsurarea pierderilor şi a curentului de mers în gol se execută la tensiunea de 380 V, 50 Hz, precum şi la tensiunea nominală. Încercarea se face cu una dintre înfăşurările transformatorului pe plotul corespunzător U_{nom}, celelalte înfăşurări fiind lăsate deschise.

Valoarea tensiunii aplicate se consideră media aritmetică a celor trei tensiuni de linie măsurate. Curentul de mers în gol se consideră media aritmetică a celor trei curenţi de linie. Pierderile determinate la tensiune redusă se vor raporta la tensiunea nominală.

Pe lîngă executarea încercărilor generale descrise la începutul capitolului, la întreruptoare se mai execută şi următoarele probe:

— măsurarea timpilor medii de anclanşare şi de declanşare a întreruptorului şi verificarea simultaneităţii la închiderea contactelor;

— verificarea întreruptorului la anclanşări şi declanşări repetate.

G. MĂSURAREA TIMPILOR MEDII DE ANCLANŞARE ŞI DE DECLANŞARE A ÎNTRERUPTORULUI ŞI VERIFICAREA SIMULTANEITĂŢII LA ÎNCHIDEREA CONTACTELOR

Această măsurare se efectuează cu secundometre la întreruptoarele cu tensiuni nominale mai mici de 110 kV şi cu oscilografe la cele cu tensiuni nominale mai mari sau egale cu 110 kV.

Valorile medii ale timpilor de anclanşare şi declanşare se determină din trei pînă la cinci citiri.

La întreruptoarele cu mai multe contacte în serie pe fază se măsoară timpii de acţionare şi succesiunea corectă a operaţiilor intermediare.

Rezultatele măsurărilor timpilor de anclanşare şi de declanşare trebuie să corespundă valorilor cuprinse în buletinele de fabricaţie.

Valorile maxime ale nesimultaneităţii între elementele aceleiaşi faze, cît şi între faze, trebuie să se încadreze în limita de maximum 5 ms.

H. VERIFICAREA ÎNTRERUPTORULUI LA ANCLANŞĂRI ŞI LA DECLANŞĂRI REPETATE

Încercarea cuprinde următoarele acţionări ale întreruptorului:

— 30 de acţionări, aplicîndu-se dispozitivului de acţionare, tensiunea, respectiv presiunea nominală;

— 10 acţionări la tensiune, respectiv presiune minimă;

— 10 acţionări la tensiune, respectiv presiune maximă.

Funcţionarea trebuie să fie fără defecţiuni.

I. VERIFICĂRI LA MAŞINILE ELECTRICE

La maşinile electrice, în afara încercărilor generale se mai execută şi următoarele încercări:

— *măsurarea vibraţiilor lagărelor*, care se execută cu aparate speciale pentru determinarea amplitudinilor vibraţiilor;

— *determinarea caracteristicii de scurtcircuit*, care se obţine măsurîndu-se curentul de scurtcircuit în funcţie de curentul rotoric:

$$IK_{(3)} = f(I_{rot});$$

— *determinarea caracteristicii de mers în gol*, care se obţine prin măsurarea tensiunii la bornele generatorului în funcţie de curentul de excitaţie:

$$U = f(I_{ex});$$

— *simetria sistemului de tensiune produse de generatorul sau de compensatorul sincron*. Se măsoară tensiunea pe fază la secundarele transformatoarelor de tensiune, care trebuie să coincidă cu cea a sistemului la care se conectează generatorul. La turaţia nominală, simetria se apreciază după raportul dintre

diferența valorilor maxime și minime ale tensiunilor de linie măsurate și valoarea lor medie, automatul de dezexcitare rapidă a generatorului fiind deconectat;

— *timpul de stingere a cîmpului magnetic din momentul deconectării circuitului rotoric*, care se obține ridicîndu-se curba:

$$U_{gen} = f(t).$$

La motoarele electrice, asincrone, în afara încercărilor principale se mai execută și măsurarea parametrilor electrici la pornire. Cu ocazia pornirii motoarelor electrice se determină:

— curentul absorbit la pornire; se recomandă la motoare de importanță mare, în funcție de condițiile de pornire, ca agregatul antrenat să fie decuplat;

— timpul scurs de la conectarea mașinii la bare pînă la atingerea turației nominale; la turația nominală se măsoară curentul de mers în gol.

REZUMAT

- Procesul de realizare a instalațiilor electroenergetice cuprinde trei perioade distincte:
  - perioada de pregătire și execuție;
  - perioada de punere în funcțiune (perioada de 72 h);
  - perioada de exploatare în garanție.

La punerea în funcțiune și darea în exploatare a instalațiilor energetice se au în vedere următoarele operații:

- măsurarea rezistenței de izolație;
- măsurarea coeficientului de absorbție al înfășurărilor;
- încercarea izolației cu tensiune mărită;
- măsurarea rezistențelor ohmice și a capacității diferitelor elemente;
- măsurarea curentului și a pierderilor de mers în gol la mașini;
- verificarea întreruptoarelor (timpi proprii);
- verificări la mașinile electrice rotative.

ÎNTREBĂRI RECAPITULATIVE

1. *Care este conținutul fiecărei perioade tehnologice din cadrul procesului de realizare a instalațiilor electroenergetice?*
2. *Care sînt probele ce se efectuează în perioadele de montaj și punere în funcțiune la transformatoare și autotransformatoare?*
3. *Idem, la liniile electrice aeriene?*
4. *Idem, la liniile electrice în cablu?*
5. *Care sînt probele ce se execută la întreruptoare și cum se efectuează?*
6. *Care sînt verificările ce se efectuează la mașinile electrice rotative?*

REPARAREA ECHIPAMENTELOR ELECTRICE

Mentenanța *reprezintă totalitatea acțiunilor planificate și neplanificate de testare, întreținere și reparație, efectuate asupra unei instalații, sau element de instalație, în vederea obținerii unui nivel de siguranță dat.* Sînt definite două tipuri de acțiuni de mentenanță:

— *mentenanța-preventivă*, care are drept scop principal reducerea riscului de producere a unui defect, în special prin acțiuni de testare (încercări profilactice), de schimbare a unor piese supuse uzurii, de ajustare a funcționării, de revizii și reparații planificate etc.;

— *mentenanța-corectivă*, care are drept scop numai înlăturarea unor funcționări defectuoase sau a unor avarii.

Ambele tipuri de mentenanță necesită durate de întreruperi, primul caracterizîndu-se prin întreruperi programate (planificate, cu durate prestabilite), iar al doilea, prin întreruperi neprogramate (neplanificate, cu durate aleatorii).

Funcționarea instalațiilor electrice se caracterizează prin numărul de ore de utilizare a echipamentelor și a instalațiilor. Scoaterea din funcțiune a instalațiilor electrice sau a unor părți din acestea poate duce la întreruperea furnizării energiei electrice unui anumit număr de consumatori. De aceea, în cazul instalațiilor electrice, reparațiile accidentale, neplanificate, dezorganizează exploatarea și pot conduce la pierderi importante pentru economia națională. Această caracteristică a instalațiilor electrice impune ca reparațiile lor să fie executate în mod organizat și planificat. Organizarea reparării echipamentului electric poate fi efectuată după diferite metode. În general există două feluri de reparații:

— *periodice*, executîndu-se în situația în care pe baza supravegherii și a verificării periodice, se constată că piesele prezintă o uzură vizibilă, dar care nu influențează încă asupra bunei funcționări a ansamblului. În astfel de cazuri se programează reparația echipamentului. Perioadele dintre reparații nu sînt egale, ci depind de gradul de uzură a echipamentului;

— *preventiv planificate*, executîndu-se la anumite intervale de timp dinainte stabilite, fără a se aștepta uzarea vizibilă a pieselor.

Conform normativelor în vigoare, lucrările de întreținere și de reparații se clasifică în următoarele categorii:

a) revizii tehnice (RT);

b) reparații:

— reparația curentă I (RC_1);

— reparația curentă II (RC_2);

— reparația capitală (RK).

Încadrarea în cele două categorii — revizii tehnice şi reparaţii — a lucrărilor care se execută se face în funcţie de:

— volumul lucrărilor ce trebuie executate şi valoarea de deviz a acestora;

— ciclul de funcţionare al utilajului;

— starea fizică a instalaţiilor la data opririi.

Lucrările de executat, pe tipuri de reparaţii, se stabilesc prin nomenclatoarele de lucrări aprobate de forul tutelar al întreprinderilor pentru fiecare tip de instalaţie.

Al doilea gen de reparaţii este de preferat, deoarece se bazează pe studiul uzurii echipamentelor în raport cu intensitatea folosirii lor în exploatare. Această metodă de reparaţii se caracterizează prin faptul că reparaţiile au un caracter preventiv şi se execută pe baza unui plan. Folosirea acestei metode în instalaţiile electrice oferă posibilitatea prevenirii apariţiei de avarieri accidentale, prin executarea la timp a controlului şi a reparaţiilor planificate. De asemenea, metoda permite existenţa unei planificări raţionale cu materiale şi piese de schimb pentru reparaţii.

Înlocuirea sau repararea la timp a elementelor şi a pieselor care au ajuns la limita duratei lor de serviciu constituie factorul esenţial în sistemul reparaţiilor preventive, deoarece prin aceasta se evită scoaterea accidentală din funcţiune a unui ansamblu.

De aici rezultă necesitatea de a se înlocui sau repara, în cursul exploatării unui echipament sau aparat, unele piese de mai multe ori decît altele, a căror uzură se produce mai lent.

A. REVIZIA TEHNICĂ *(RT)*

Revizia tehnică cuprinde ansamblul de operaţii executate sistematic (periodic) pentru verificarea, curăţarea, ungerea, înlocuirea unor piese uzate şi eliminarea unor defecţiuni ce impun lucrări de mică amploare, care are şi scopul de a constata în prealabil starea tehnică a utilajelor înainte de executarea primei reparaţii planificate. Revizia tehnică se execută cu oprirea agregatului, cu demontarea numai a unor subansambluri ale acestuia, conform nomenclatorului de operaţii aprobat şi în funcţie de starea fizică a acestuia.

Revizia tehnică are drept scop menţinerea stării tehnice corespunzătoare a utilajului, a prevenirii şi eliminării defecţiunilor la părţi care cu un grad de fiabilitate redus (de exemplu, garniturile rulmenţilor), curăţirea suprafeţelor de schimb de căldură, verificarea organelor şi a fluidelor din ansamblul de ungere şi înlocuirea după caz, verificarea şi punerea la punct a organelor de siguranţă, protecţie şi automatizare.

Revizia tehnică se execută pe locul de lucru al instalaţiei sau utilajul de către echipe specializate. În cazul unor utilaje situate în exterior (întreruptoare, separatoare, transformatoare de mică putere etc.) se recomandă ca revizia să se execute în atelier, prin înlocuirea utilajului supus aceste operaţii cu un alt utilaj cu performanţe tehnice similare.

Ordinea de execuţie a lucrărilor cu ocazia efectuării unei revizii tehnice este următoarea:

— pregătirea utilajului pentru revizia tehnică;

— controlarea cu atenţie a stării de uzură a utilajului, pentru a se determina posibilităţile de funcţionare în continuare şi eventualele reparaţii necesare remedierii uzurilor constatate;

— executarea operaţiilor de reglare a utilajului, a subansamblurilor şi a mecanismelor sale componente, înlăturarea jocurilor anormale.

În cazul în care cu ocazia verificării stării tehnice a utilajului, în cadrul reviziei tehnice, se constată un defect care ar putea provoca întreruperea în funcţionare a utilajului, iar pentru eliminarea defecţiunilor constatate este necesară înlocuirea unor piese sau a unor subansambluri etc., atunci se va executa în continuare reparaţia curentă necesară.

Atunci cînd se constată, în perioada de funcţionare, nerespectarea regulamentului de exploatare sau de întreţinere a utilajului controlat şi apariţia unor defecţiuni, ca urmare a acestor neconformări, care periclitează siguranţa în funcţionare, se vor lua măsuri imediate pentru înlăturarea deficienţelor constatate, oprindu-se utilajul din funcţiune pînă la remedierea lor.

B. REPARAŢIA CURENTĂ *(RC)*

Reparaţia curentă este ansamblul de operaţii prin care se remediază toate defecţiunile apărute la utilaje în perioada exploatării, cu excepţia operaţiilor de remediere a defectelor care se efectuează în cadrul reparaţiilor capitale.

Reparaţiile curente cuprind următoarele categorii de lucrări:

— lucrări de reparaţii curente, cu înlocuirea pieselor defecte, fără demontarea agregatelor, a ansamblurilor sau a subansamblurilor respective;

— lucrări de reparaţii curente, constînd în demontarea parţială sau totală a agregatelor, a ansamblurilor defecte şi remedierea sau înlocuirea lor cu altele, noi sau reparate.

În funcţie de mărimea ciclului de reparaţii, de volumul lucrărilor care se execută şi de valoarea pieselor şi a subansamblurilor reparate, recondiţionate sau înlocuite, reparaţiile curente se împart în:

— reparaţii curente de gradul I (RC_1);

— reparaţii curente de gradul II (RC_2).

Cu ocazia reparaţiilor curente se pot efectua şi lucrări de modernizare şi de îmbunătăţire a anumitor părţi componente ale utilajului de către echipe de reparaţii specializate.

C. REPARAŢIA CAPITALĂ *(RK)*

Reparaţiile capitale trebuie executate atunci cînd, datorită uzurii, echipamentul nu mai are randamentul, precizia de lucru sau siguranţa în funcţionare şi trebuie să fie readus cît mai aproape de starea sa iniţială, în vederea menţinerii duratei de serviciu stabilită. Reparaţia capitală a unui echipament sau aparat electric se face prin demontarea totală a pieselor, prin veri-

ficarea și înlocuirea elementelor uzate cu altele noi și prin repararea sau restabilirea dimensiunilor normale la elementele cu grad de uzură mai puțin avansată, astfel încît ele să poată asigura funcționarea pe parcursul ciclului stabilit prin norme.

Cu ocazia reparațiilor curente și capitale se execută și lucrări de modernizare și de îmbunătățire a anumitor părți ale echipamentelor, în scopul de a li se reda parametrii inițiali de funcționare, îmbunătățirea randamentului, nivelul de tensiune etc., corespunzător condițiilor de funcționare. De asemenea, în scopul aducerii echipamentelor în concordanță cu noile condiții de exploatare și de siguranță impuse, se pot înlocui aparatele uzate cu altele corespunzătoare stadiului tehnicii în momentul executării reparației.

D. VOLUMUL REPARAȚIILOR

Datorită particularităților constructive, echipamentele și aparatele electrice prezintă în exploatare uzuri reduse ale pieselor componente. La aceste instalații, periodicitatea diverselor feluri de reparații este condiționată în primul rînd de numărul de ore de funcționare. Pe baza experienței acumulate pentru fiecare tip de echipament și aparat există norme ce stabilesc duratele de timp la care aceste instalații se scot în reparație.

Totalul zilelor de funcționare dintre două reparații capitale (respectiv din momentul dării în exploatare a echipamentului nou pînă la prima reparație capitală) se numește *ciclu de reparații*. În cuprinsul ciclului de reparații sînt înseriate într-o succesiune bine stabilită celelalte feluri de reparații (reviziile tehnice și reparațiile curente). Această succesiune formează structura ciclului de reparații, care poate fi reprezentată printr-o succesiune a indicativelor diferitelor tipuri de reparații. De exemplu, pentru un motor electric acest ciclu este:

$$RK - RT - RT - RT - RC - RT - RT - RT - RK,$$

în care:

RK este reparația capitală;

RT — revizia tehnică;

RC — reparația curentă.

În funcție de natura echipamentului sau a aparatului electric, intervalele de timp la care se efectuează diversele lucrări de reparații sînt foarte diferite. Astfel, reviziile tehnice la unele generatoare se execută la intervale de 20—30 de zile, reparațiile curente la 3—6 luni, iar reparațiile capitale la intervale de cîțiva ani. Transformatoarele de putere au cicluri de reparații mult mai mari. Reviziile tehnice se execută o dată pe an, reparațiile curente o dată la 5—6 ani, iar reparațiile capitale la intervale de 10—20 de ani. Există transformatoare, în special cele de puteri mici, la care practic se execută numai revizii tehnice, nefiind necesare lucrări de reparații curente sau capitale.

Un alt factor important al lucrărilor de reparații este durata medie de retragere din exploatare a instalațiilor pentru efectuarea reparației. Echipa-

mentele trebuie să fie retrase din exploatare un timp cît mai scurt. Aceasta depinde în mare măsură de buna organizare a lucrărilor de reparații, de dotare a echipelor cu utilaje tehnologice și scule de aprovizionare din timp a locului de muncă.

E. ORGANIZAREA ECHIPELOR PENTRU EXECUTAREA REPARAȚIILOR

Organizarea echipelor de reparații trebuie să țină seamă de o serie de factori, și anume:

— lucrările de reparații să se execute în timp minim;

— calitatea lucrărilor să fie la nivel ridicat;

— productivitatea muncii să fie corespunzătoare;

— calificarea personalului să fie la nivelul cerut de complexitatea lucrărilor;

— echipele de lucru să fie dotate cu cele necesare bunei desfășurări a procesului tehnologic;

— felul reparației și tipul echipamentului.

Acești factori determină organizarea echipelor care, de la caz la caz, poate fi făcută cu:

— echipe formate din personalul de exploatare și de întreținere al centralei sau al secției de rețele;

— echipe specializate pe genuri de lucrări la nivelul întreprinderii sau al sectorului energetic.

Lucrările de revizii tehnice și de reparații curente la generatoare, motoare și stații de transformare se pot executa cu echipe formate din personalul de exploatare și de întreținere al unităților la care se găsește montat echipamentul.

Pentru lucrările de reparații ale releelor, aparatelor de măsurare și întreruptoarelor este indicat să se folosească echipe specializate la nivelul secției sau chiar al întreprinderii.

Lucrările de reparații, capitale ale generatoarelor și ale transformatoarelor se execută, de regulă, de către echipe specializate la nivelul întreprinderii sau al sectorului energetic (de exemplu, lucrările de rebobinare ale generatoarelor). Pentru reparațiile capitale ale transformatoarelor cu puteri mai mari de 10 MVA inclusiv sînt organizate ateliere de reparații în mai multe puncte ale țării.

Mărimea echipelor se alege cît mai judicios, ținîndu-se seama de volumul lucrărilor de executat și de specialitatea acestora. De exemplu, echipele care execută lucrări în stațiile și posturile de transformare sînt formate din 4—6 muncitori. Dintre aceștia, 1—2 sînt muncitori lăcătuși. Echipele pentru reparații de dispozitive de protecție prin relee, automatizare, măsurări, se formează din 2—3 electricieni de înaltă calificare. Liniile electrice aeriene cu tensiuni de 110 kV și mai mari sînt reparate de formații compuse din 7—10 muncitori.

Echipele de reparații la posturi și stații de transformare se dotează cu truse de chei, mașini de găurit, polizor portativ, transformator de sudare, lampă cu benzină, macara diferențială, vinciuri etc. Pentru aceste echipe se amenajează remorci pe un singur ax, care sînt remorcate de mașini tehnologice.

Echipele pentru lucrări de cabluri trebuie să fie dotate, pe lîngă sculele obișnuite, cu instalații pentru topit masa neagră și galbenă, lămpi cu benzină și butelii de gaze cu arzătoare speciale, unelte de săpat, megohmmetre și mijloace de protecție contra accidentelor.

Calificarea personalului din echipele de reparații, precum și completarea cunoștințelor profesionale ale acestora trebuie să fie mereu în atenția conducerii secțiilor, a întreprinderilor, precum și a echipelor înseși.

F. EFECTUAREA REVIZIILOR ȘI A REPARAȚIILOR CURENTE

Reviziile și reparațiile curente la echipamentele și aparatele primare se efectuează numai după ce instalația a fost scoasă din exploatare, iar la locul de muncă au fost luate toate măsurile de protecție a muncii, pentru evitarea în totalitate a posibilităților de accidentare.

Personalul de exploatare execută toate operațiile prevăzute în autorizația de lucru și apoi predă instalația ce urmează a fi reparată, îndeplinind formalitățile necesare și totodată precizînd defectele observate în timpul exploatării. După ce sînt admise la locul de muncă, echipele de reparații trec la organizarea cît mai corespunzătoare a procesului tehnologic. Șeful de echipă sau maistrul responsabil de lucrare instruiesc întreaga echipă informînd-o asupra situației instalației și asupra pericolului de accidentare. Se împart apoi muncitorii pe operații și șeful de echipă urmărește în permanență buna desfășurare a lucrărilor, nefiindu-i permis să părăsească locul de muncă și echipa.

Pentru ca aprecierea calității funcționării instalației să nu fie subiectivă, este necesar să se efectueze o serie de încercări și măsurări. Se măsoară rezistența de izolație a diverselor părți componente. Se fac probe de ulei, se măsoară vibrațiile la mașinile rotative și se verifică timpii de lucru ai întreruptoarelor. Se măsoară apoi rezistențele de contact, făcîndu-se, de asemenea, și alte probe necesare pentru a se putea trage concluzii asupra stării instalației.

G. EFECTUAREA REPARAȚIILOR CAPITALE

Înainte de reparație se stabilește starea echipamentului, ținîndu-se seamă de fișele tehnice ale echipamentelor și de observațiile din timpul exploatării. De asemenea, este necesar să se întocmească documentații tehnice de reparații generale și pentru anumite operații.

Pentru ca durata de reparație să fie cît mai scurtă, înainte de retragerea echipamentului din exploatare se fac toate lucrările premergătoare. În cazul generatoarelor, echipele de reparații se dotează cu mijloace de ridicat și de transportat, mese de lucru, capre pentru așezarea rotoarelor, surse de aer comprimat și de lumină. Se verifică toate dispozitivele de lucru și sculele, pentru a fi în perfectă stare de funcționare. Se iau măsuri ca toate materialele și piesele de schimb să fie aprovizionate și depozitate din timp și în condiții corespunzătoare.

Înainte de începerea reparației capitale se efectuează o serie de observații vizuale și măsurări asupra echipamentelor și aparatelor în timpul funcționării. Se verifică starea lagărelor la mașinile rotative și se măsoară vibrațiile.

În timpul reparației capitale, pe baza graficelor și a programelor de lucru încheiate, fiecare muncitor trebuie să cunoască ce efectuează în timpul acordat acestora.

După efectuarea lucrărilor se execută măsurări și încercări în scopul determinării calității lucrărilor. Predarea în exploatare a unui echipament reparat capital se face pe baza unui proces-verbal la care se anexează buletinele de încercări.

H. MĂSURI DE PAZĂ CONTRA INCENDIILOR

Cu ocazia reparațiilor se va ține obligatoriu seama de măsurile impuse prin normele de pază contra incendiilor. Acestea stabilesc modalitățile de depozitare și manipulare a materialelor inflamabile folosite cu ocazia reparațiilor, măsurile de localizare și stingere a incendiilor, responsabilitățile membrilor echipelor de reparații și a șefilor de echipe etc.

De asemenea, tot prin aceste norme sînt stabilite măsuri de predare corespunzătoare și fără pericol de incendiu a instalațiilor reparate.

I. MĂSURI DE TEHNICĂ A SECURITĂȚII ȘI PROTECȚIEI MUNCII

Personalul care lucrează la revizii și reparații în instalațiile energetice trebuie să fie instruit în ceea ce privește normele de tehnică a securității și protecției muncii în instalațiile energetice. De asemenea, pentru fiecare gen de lucrări trebuie ca cel care admite la lucru o echipă de muncitori (maistru, șef de echipă etc.) să efectueze instructajul specific de protecție a muncii, inclusiv acela de acordare al primului ajutor în caz de accident, întocmind în acest scop un proces-verbal ce va fi semnat de către toți muncitorii în subordine.

Se vor lua măsuri ca toate părțile de instalație care pot fi puse accidental sub tensiune să fie legate la pămînt în mod vizibil (prin scurtcircuitare, cuțite de legare la pămînt etc.); de asemenea, se vor efectua separarea vizibilă a părților la care se efectuează reparații prin deschiderea separatoarelor, desfacerea racordurilor sau a buclelor etc.

Echipele de lucru vor fi înzestrate, în funcție de specificul lucrărilor, cu următoarele elemente:

— cizme și mănuși izolante (dielectrice);
— covoare de cauciuc;
— clești izolanți;
— ochelari de protecție;
— trusă sanitară și instrumentar de acordare a primului ajutor etc.

De asemenea, se vor prevedea plăcuțe avertizoare plasate la loc vizibil și avînd conținutul adecvat lucrării.

REZUMAT

Lucrările de întreţinere şi reparaţie se clasifică astfel:

– revizie tehnică *(RT)*

– reparaţie:
- – reparaţie curentă I *(RCI)*
- – reparaţie curentă II *(RCII)*
- – reparaţie capitală *(RK)*

- Revizia tehnică se execută periodic în scopul menţinerii stării tehnice corespunzătoare a utilajului.
- Reparaţiile se execută atunci cînd instalaţia prezintă uzură sau după producerea unei avarii.

ÎNTREBĂRI RECAPITULATIVE

1. *Ce reprezintă mentenanţa şi care sînt cele două tipuri de acţiuni de mentenanţă?*
2. *În ce condiţii se efectuează revizia tehnică (RT) şi ce operaţii cuprinde?*
3. *Ce sînt reparaţiile curente (RC) şi care sînt categoriile de lucrări ce se efectuează în cadrul lor?*
4. *Cînd se execută reparaţiile capitale (RK) şi care este volumul reparaţiilor respective?*
5. *Cum se organizează echipele de lucru pentru executarea reparaţiilor?*
6. *Care sînt măsurile de tehnică a securităţii şi protecţiei muncii necesare în cadrul lucrărilor de întreţinere şi reparaţie?*

CONTROLUL CALITĂȚII LUCRĂRILOR DE REPARAȚII. ÎNCERCĂRI PROFILACTICE

În acțiunea de control al calității lucrărilor executate, indiferent dacă sînt lucrări noi, de revizii, sau de reparații o importanță deosebită o prezintă încercările profilactice ale instalațiilor sau ale elementelor componente. În cele ce urmează sînt descrise încercările profilactice principale pentru cîteva elemente componente ale sistemului electroenergetic.

A. MĂSURĂRI ȘI ÎNCERCĂRI LA GENERATOARE ȘI COMPENSATOARE SINCRONE

1. MĂSURAREA REZISTENȚEI DE IZOLAȚIE ȘI A COEFICIENTULUI DE ABSORBȚIE A ÎNFĂȘURĂRILOR

Măsurarea rezistenței de izolație se efectuează cu megohmmetrul, a cărui tensiune se alege în funcție de tensiunea nominală a înfășurărilor, conform tabelului 23.1.

TABELUL 23.1

Tensiunea nominală a megohmmetrului de încercare în funcție de tensiunea nominală a izolației

Tensiunea nominală a înfășurării V	Tensiunea megohmmetrului V
≤500	500
500–3 000	1 000
>3 000	2 500

Măsurarea se face:

— în stare rece, mașina avînd temperatura mediului ambiant;

— în stare caldă, mașina avînd temperatura corespunzătoare regimului de lucru sau diferită de aceasta cu maximum 10 grd.

Totodată se măsoară și temperatura înfășurărilor.

Valorile obținute trebuie să nu fie mai mici de 70% din valorile date de întreprinderea constructoare la aceeași temperatură, iar în lipsa acestora, rezistența de izolație trebuie să fie:

— la mașini cu tensiunea nominală a înfășurării mai mică sau egală cu 1 000 V:

$$R_{iz} > 1\ \mathrm{M\Omega}; \qquad (23.1)$$

— la mașini cu tensiunea nominală a înfășurării mai mare de 1 000 V:

$$R_{iz}\,(75 °\mathrm{C}) \geqslant \frac{U_n}{1\,000 + \frac{P_n}{100}}, \qquad (23.2)$$

în care:

R_{iz} (75 °C) este rezistența de izolație măsurată la 75 °C, în MΩ;

U_n — tensiunea nominală între faze a înfășurărilor, în V;

P_n — puterea aparentă nominală a mașinii, în kVA.

În cazul în care rezistența de izolație nu se poate măsura la temperatura de 75 °C, ci la o altă temperatură, atunci rezistența de izolație la 75 °C poate fi determinată cu relația:

$$R_{iz}\,(75 °\mathrm{C}) = \frac{R_{izt}}{K}, \qquad (23.3)$$

în care:

R_{izt} este rezistența de izolație măsurată la o altă temperatură, t;

K — un coeficient variabil cu temperatura t, luat din diagrama din figura 23.1.

De exemplu: se măsoară R_{iz} la 40 °C, cu o valoare de 5 MΩ.

Pentru a se găsi rezistența de izolație la 75 °C, aplicîndu-se relația (23.3) se obține:

$$R_{iz}\,(75 °\mathrm{C}) = \frac{R_{iz}\,40 °\mathrm{C}}{K\,40 °\mathrm{C}} = \frac{5}{3{,}9} = 1{,}28\ \mathrm{M\Omega}.$$

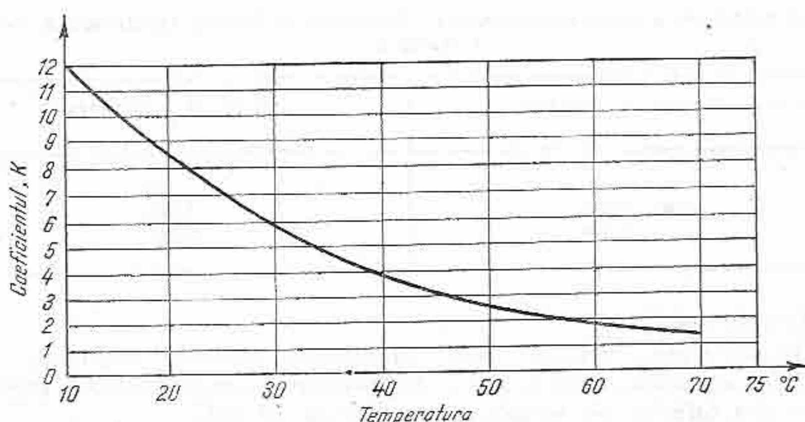


Fig. 23.1. Variația coeficientului *K* în funcție de temperatură.

Măsurarea coeficientului de absorbţie. Pentru aprecierea gradului de umiditate la maşini cu tensiuni nominale mai mari sau egale cu 3 000 V şi cu puteri mai mari sau egale cu 1 000 kVA, se măsoară cu megohmmetrul de 2 500 V rezistenţa de izolaţie a înfăşurărilor R_{15} (valoarea obţinută prin aplicarea tensiunii timp de 15 s) şi rezistenţa de izolaţie a înfăşurărilor R_{60} (valoarea obţinută prin aplicarea tensiunii timp de 60 s).

Raportul acestora, numit coeficient de absorbţie, trebuie să îndeplinească condiţia:

$$K_{abs} = \frac{R_{60'}}{R_{15'}} \geqslant 1{,}3. \qquad (23.4)$$

Măsurarea rezistenţei de izolaţie şi a coeficientului de absorbţie se efectuează la punerile în funcţiune, la reparaţia înfăşurărilor sau la reviziile tehnice. Urmărirea lor periodică indică, în timp, în ce măsură gradul de izolaţie al înfăşurărilor evoluează înspre o stare de înrăutăţire sau de menţinere a calităţii electroizolante.

2. ÎNCERCAREA IZOLAŢIEI ÎNFĂŞURĂRII STATORICE CU TENSIUNE ALTERNATIVĂ SAU REDRESATĂ

Încercarea se poate efectua în două feluri: cu tensiune alternativă şi cu tensiune redresată, fără ca un tip de probă să îl excludă pe celălalt.

Încercarea cu tensiune alternativă (50 Hz) se efectuează pentru fiecare fază în parte, faţă de pămînt, celelalte două fiind legate la masă.

Valoarea tensiunii de încercare este funcţie de puterea şi de tensiunea nominală a maşinii, fiind determinată de formulele cuprinse în tabelul 23.2.

TABELUL 23.2

Tensiunile de încercare în curent alternativ (50 Hz) ale înfăşurărilor statorice ale maşinilor sincrone

Puterea nominală a maşinii MW	Tensiunea nominală a maşinii kV	Tensiunea de încercare kV
< 10 MW	Indiferent	K (1 kV + 2 U_{nom}) dar minimum 1,5 kV
⩾10 MW	$U_{nom} \leqslant 2{,}0$ kV	K (1 kV + 2 U_{nom})
	$2 < U_{nom} \leqslant 6{,}0$ kV	K (3 kV + 2 U_{nom})
	$6 < U_{nom} \leqslant 17{,}5$ kV $U_{nom} > 17{,}5$ kV	Conform acordului furnizor-beneficiar

Coeficientul K are următoarele valori:
$K = 1$ la încercări în fabrică sau la reparaţia totală a fazelor sau pentru faza a cărei izolaţie a fost înlocuită;
$K = 0{,}85$ la punerea în funcţiune;
$K = 0{,}75$ în exploatare sau pentru toată înfăşurarea unei faze după o reparaţie parţială.

Izolația trebuie să reziste la încercare timp de un minut, avînd un curent de scurgere stabilizat.

Valoarea curentului de scurgere nu se normează, dar se compară cu valorile prescrise de întreprinderea constructoare și cu măsurările anterioare.

Încercarea cu tensiune redresată se efectuează în aceleași condiții de încercare a fiecărei înfășurări, față de masă, celelalte două fiind legate la masă, valoarea tensiunii aplicate fiind dată de formula:

$$U_{înc.c.c.} = 1{,}6\ U_{înc.c.a.} \tag{23.5}$$

Ca și în cazul încercării cu tensiune alternativă, izolația trebuie să reziste la tensiunea de încercare timp de 1 min, avînd o valoare stabilizată a curentului de scurgere, a cărui valoare nu se normează, ci se compară cu valorile prescrise de întreprinderea constructoare sau cu cele obținute anterior.

Este util ca, în timpul ridicării tensiunii aplicate, să se ridice cîteva puncte caracteristice (tensiune aplicată — curent de scurgere).

În cazul **încercării cu tensiune continuă mărită**, curentul dezvoltat se compune din:

— curentul de încărcare (capacitiv);

— curentul de absorbție;

— curentul de pierderi sau de conducție.

Curentul de încărcare (capacitiv) pornește de la valori mari, pentru ca apoi, în timpul încercării, să scadă la zero, după relația:

$$I_c = \frac{E}{R_e - \frac{t}{R_e C}}, \tag{23.6}$$

în care:

I_c este curentul capacitiv, în A;
E — tensiunea aplicată, în V;
R_e — rezistența totală a circuitului, în Ω;
C — capacitatea izolației încercate, în F;
t — timpul de la aplicarea tensiunii, în s.

Curentul de absorbție se datorește polarizării și acumulării sarcinii electrice într-un dielectric imperfect, la aplicarea tensiunii de încercare. Inițial, acest curent are o valoare mare, scăzînd apoi la zero după relația:

$$I_a = AVCt^{-B}, \tag{23.7}$$

în care:

I_a este curentul de absorbție, în A;
A și B sînt constante care depind de tipul dielectricului;
V este creșterea de tensiune, dacă aceasta are o creștere în trepte, în V;
t — timpul în care crește tensiunea, în s.

Curentul de pierderi se stabilește pe baza legii lui Ohm, adică:

$$I_p = \frac{E}{R_s}, \tag{23.8}$$

în care R_s este rezistența dielectricului.

După cum s-a arătat, componenta capacitivă şi de absorbţie după trecerea unui anumit timp se anulează, curentul de pierderi devenind curent de regim. De aceea, mărindu-se tensiunea suficient de încet, se poate încerca în curent continuu un produs cu o capacitate mare, chiar cu o instalaţie capabilă să producă numai cîţiva miliamperi.

Înlocuirea unei încercări în tensiune alternativă cu o încercare în tensiune continuă pune problema valorii echivalente a tensiunii, astfel încît rezultatele interpretate să ducă la aceleaşi concluzii.

3. ÎNCERCAREA IZOLAŢIEI ÎNFĂŞURĂRII ROTORICE CU TENSIUNE ALTERNATIVĂ MĂRITĂ

Această încercare se efectuează cu o tensiune de zece ori mai mare decît cea nominală de excitaţie, însă fără să se depăşească 3 500 V. Se recomandă ca încercarea să se facă la turaţia nominală a rotorului. Izolaţia trebuie să reziste la tensiunea de încercare timp de 1 min.

Măsurarea se efectuează la puneri în funcţiune sau după reparaţii.

4. ÎNCERCAREA IZOLAŢIEI ÎNTRE SPIRELE ÎNFĂŞURĂRII STATORICE CU TENSIUNE ALTERNATIVĂ MĂRITĂ INDUSĂ

În acest caz se deosebesc două genuri de încercări:

— la generatoarele încercate separat, la care valoarea tensiunii de încercare este 1,5 U_n pentru hidrogeneratoare şi 1,3 U_n pentru turbogeneratoare sau compensatoare sincrone, izolaţia trebuie să reziste la tensiunea de încercare timp de 5 min;

— la generatoarele încercate împreună cu transformatorul bloc, la care valoarea tensiunii de încercare este 1,2 U_n, atît la turbogeneratoare cît şi la hidrogeneratoare, izolaţia trebuie să reziste la tensiunea de încercare timp de 1 min.

Măsurările se efectuează la puneri în funcţiune sau după reparaţii.

5. ÎNCERCAREA IZOLAŢIEI CIRCUITULUI DE EXCITAŢIE (fără înfăşurările rotorice şi ale excitatoarei) CU TENSIUNE ALTERNATIVĂ MĂRITĂ

Valoarea tensiunii de încercare este de 1 000 V. În cazul în care există aparate a căror tensiune de încercare este inferioară celei a circuitului de excitaţie, se vor încerca separat. Izolaţia trebuie să reziste la tensiunea de încercare timp de 1 min.

Măsurarea se efectuează la puneri în funcţiune ori la reparaţii sau modificări în circuitul de excitaţie.

B. MĂSURĂRI ȘI ÎNCERCĂRI LA TRANSFORMATOARELE DE PUTERE, AUTOTRANSFORMATOARE, BOBINE DE COMPENSARE ȘI BOBINE DE STINGERE

Încercările și măsurările efectuate asupra transformatoarelor de putere, precum și periodicitatea acestora vor respecta în primul rînd indicațiile furnizorului. Toate încercările și măsurările se efectuează la o temperatură a transformatorului de minimum +10 °C. Dacă temperatura transformatorului este sub +10 °C, el se încălzește pînă la atingerea cel puțin a acestei valori și numai atunci cînd încep probele și măsurările.

1. MĂSURAREA REZISTENȚEI DE IZOLAȚIE A ÎNFĂȘURĂRILOR ȘI A COEFICIENTULUI DE ABSORBȚIE

Măsurarea rezistenței de izolație se efectuează cu megohmmetrul la o durată de 60 s, și anume:

— pentru înfășurări cu $U_{nom} \leqslant 500$ V, cu megohmmetrul de 1 000 V;
— pentru înfășurări cu $U_{nom} > 500$ V, cu megohmmetrul de 2 500 V.

Valoarea minimă a rezistenței de izolație R_{60}, față de valorile obținute de întreprinderea constructoare, vor fi:

— 75% la transformatoare cu $U_{nom} \leqslant 110$ kV;
— 85% la transformatoare cu $U_{nom} \leqslant 220$ kV;
— pentru înfășurările cu $U_{nom} \leqslant 500$ V, la care nu există buletine de fabricație ale întreprinderii constructoare, valoarea minimă a rezistenței de izolație va fi de 2 M Ω, la temperaturi de 20 ± 10 °C.

În lipsa documentației se pot folosi valorile orientative ale rezistenței de izolație cuprinse în tabelul 23.3.

TABELUL 23.3

Valori orientative ale rezistenței de izolație R_{60}, în MΩ, ale înfășurării transformatoarelor de putere, în funcție de temperatura la care se efectuează măsurarea și caracteristicile transformatoarelor

Caracteristicile transformatorului		Temperatura °C						
U_{nom}, kV	S_{nom}, MVA	10	20	30	40	50	60	70
35	10	400	300	200	130	90	60	40
35	10	900	600	400	260	180	120	80

Dacă măsurarea se efectuează la o altă temperaută decît cea din fabrică, atunci recalcularea valorii lui R_{60} ține seamă de coeficientul de variație a rezistenței de izolație în funcție de diferența de temperatură ΔT, conținut în tabelul 23.4.

TABELUL 23.4

Coeficientul K de variație a rezistenței de izolație în funcție de diferența de temperatură ΔT

ΔT, grd	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
K	1,2	1,5	1,8	2,3	2,8	3,4	4,1	5,0	6,1	7,3

Exemplu: Rezistența de izolație R_{60} a unui transformator de 110 kV măsurată de producător la temperatura de 61 °C este de 450 MΩ. La montaj, temperatura fiind de 21 °C, diferența de temperatură ΔT va fi: $\Delta T = t_2 - t_1 = 40$ °C.

La această diferență de temperatură corespunde, conform tabelului 23.4, un coeficient $K = 5,0$. Deci $R_{60} = 450 \cdot 5,0 = 2\,250$ MΩ. Această valoare trebuie însă să nu fie mai mică de 75 % din valoarea măsurată de producător, deci:

$$R_{60} = 2\,250 \times 0,75 = 1\,690 \text{ M}\Omega.$$

În consecință, valoarea rezistenței de izolație măsurate la montaj trebuie să nu fie mai mică de 1 690 MΩ.

În cazul în care nu se poate cădea exact peste o valoare a lui ΔT înscrisă în tabel, se vor lua datele care rezultă din interpolarea valorilor respective.

Măsurarea rezistenței de izolație se efectuează la puneri în funcțiune, după reparații sau revizii, la schimbarea uleiului sau periodic, o dată pe an, comparîndu-se permanent valorile obținute cu cele anterioare.

Măsurarea coeficientului de absorție K_{abs}. Ca și în cazul mașinilor sincrone, coeficientul de absorbție este raportul dintre rezistența de izolație măsurată la 60 s și cea măsurată la 15 s, adică $K_{abs} = \frac{R_{60}}{R_{15}}$.

Pentru valori ale temperaturii cuprinse între +10 și +30 °C, coeficientul de absorbție trebuie să aibă valorile cuprinse în tabelul 23.5.

TABELUL 23.5

Valori ale coeficientului de absorbție K_{abs}, funcție de tensiunea nominală U_{nom} și de puterea nominală S_{nom} a transformatoarelor

Tensiunea nominală kV	Puterea nominală MVA	K_{abs}
< 110	< 10	$\geqslant 1,3$
$\geqslant 110$	$\geqslant 10$	$\geqslant 1,5$

Măsurările se efectuează o dată pe an.

Atît rezistența de izolație, cît și coeficientul de absorbție se execută pentru fiecare fază în parte față de masă, cît și pentru fiecare fază în parte față de înfășurarea secundară sau primară legate la masă.

2. MĂSURAREA TANGENTEI UNGHIULUI DE PIERDERI DIELECTRICE tg δ A IZOLAȚIEI ÎNFĂȘURĂRILOR

Această măsurare se efectuează cu puntea Shering. Tensiunea de măsurare trebuie să nu depășească tensiunea nominală a înfășurării. În general, puntea Shering are tensiunea de 10 kV, fiind utilizată numai pentru înfășurările de

înaltă tensiune ale transformatoarelor cu tensiuni nominale peste această valoare.

Valoarea tg δ trebuie să nu depăşească cu mai mult de 30% valoarea din buletinul de fabricaţie sau cea măsurată anterior la punerea în funcţiune.

În lipsa documentaţiei se pot folosi valorile orientative ale tg δ în funcţie de temperatura şi de caracteristicile transformatoarelor, cuprinse în tabelul 23.6.

TABELUL 23.6

Valori orientative ale tg δ(%) în funcţie de temperatura la care se efectuează măsurarea şi de caracteristicile transformatoarelor

Caracteristicile transformatorului		Temperatura °C						
U_{nom}, kV	S_{nom}, MVA	10	20	30	40	50	60	70
≤ 35	< 2,5	1,5	2	2,6	3,4	4,6	6,0	8,0
≤ 35	< 10	1,2	1,5	2	2,6	3,4	4,5	6,0
> 35	≥ 10	0,8	1,0	1,3	1,7	2,3	3,0	4,0

Dacă măsurarea se efectuează la o altă temperatură decît cea indicată de producător, atunci la recalcularea tg δ se va ţine seamă de coeficientul K de variaţie a tg δ în funcţie de diferenţa de temperatură ΔT, cuprins în tabelul 23.7.

TABELUL 23.7

Coeficientul K de variaţie a tg δ, în funcţie de diferenţa de temperatură ΔT

Δ T, grd	10	15	20	25	30	35	40	45	50
K	1,3	1,5	1,7	1,9	2,2	2,5	3,0	3,5	4,4

Exemplu: Fie tg δ, măsurată de producător, la temperatura de 61 °C, cu o valoare de 1,1 %. La montaj, temperatura fiind de 21 °C, diferenţa de temperatură va fi $\Delta T = 61-21 = 40$ grd.

Acestei diferenţe de temperatură îi corespunde, conform tabelului 23.7, un coeficient $K = 3$. Deci tg δ raportat la 21 °C va fi:

$$\text{tg}\,\delta = \frac{1,1}{3} = 0,36\,\%.$$

Admiţîndu-se că la montaj tangenta pierderilor dielectrice poate fi cu 30 % mai mare, rezultă:

$$\text{tg}\,\delta = 0,36 \cdot 1,3 = 0,47\,\%.$$

În consecinţă, valoarea măsurată la montaj, la 21 °C, nu va putea depăşi 0,47 %.

În cazul în care nu se poate cădea exact peste una dintre valorile lui ΔT cuprinse în tabel, se vor lua valorile care rezultă prin interpolare.

Măsurările tangentei unghiului de pierderi dielectrice se efectuează la puneri în funcţiune, la schimbarea uleiului, după reparaţii sau o dată pe an, comparîndu-se permanent valorile obţinute cu cele anterioare.

Măsurarea se execută pe rînd pentru fiecare înfăşurare, faţă de celelalte legate la masă.

3. VERIFICAREA RIGIDITĂŢII DIELECTRICE CU TENSIUNE SINUSOIDALĂ MĂRITĂ DE 50 Hz SAU 150 Hz (aplicată sau indusă)

Verificarea se execută asupra transformatorului complet montat şi de preferinţă în stare caldă, la puneri în funcţiune sau la reparaţii, cu înlocuirea totală sau parţială a bobinelor.

Pentru transformatoarele noi sau la cele reparate fără înlocuirea bobinelor, valoarea tensiunii de încercare este 75% din tensiunea de încercare înscrisă în buletinul de fabricaţie.

Pentru transformatoarele la care s-au executat reparaţii cu înlocuirea parţială a bobinelor, tensiunea de încercare va fi 85%, iar în cazul în care bobinele s-au înlocuit total, 100% din tensiunea de încercare înscrisă în buletinul de fabricaţie.

În cazul lipsei buletinului de fabricaţie, tensiunile de încercare recomandate ale transformatoarelor cu izolaţie plină vor fi luate din tabelul 23.8.

TABELUL 23.8

Tensiuni de încercare orientative pentru transformatoarele cu izolaţie plină

U_{nom} kV	Tensiunea de încercare, la punerea în funcţiune sau după reparaţii kV	Tensiunea de încercare, după reparaţii cu înlocuirea totală a bobinajelor kV
⩽ 1	2,5	2,5
3	12	14,5
6	16,5	20
10	21	25
15	28,5	34
20	37,5	45
30	52,5	63
35	60	72
60	105	125
110	172	205
220	345	415
400	472	565

Pentru transformatoarele cu izolaţie redusă, valorile tensiunilor de încercare recomandate, în lipsa buletinului de fabricaţie, sînt cuprinse în tabelul 23.9.

TABELUL 23.9

Tensiuni de încercare orientative pentru transformatoarele cu izolaţie redusă (reţele cu neutrul pus la pămînt)

U_{nom} kV	Tensiunea de încercare, la punerea în funcţiune sau după reparaţii kV	Tensiunea de încercare, după reparaţii, cu înlocuirea totală a bobinajelor kV
110	140	170
220	290	350
400	470	580

Durata de încercare cu tensiune aplicată de 50 Hz este de 1 min.

În cazul încercării cu tensiune indusă de frecvență mărită, durata de încercare $t_{înc}$ este precizată de către producător sau, dacă aceasta nu există, se calculează cu relația:

$$t_{înc} = 60 \frac{100}{f_{înc}} [s], \tag{23.9}$$

în care $f_{înc}$ este frecvența tensiunii de încercare.

Verificarea rigidității dielectrice a izolației transformatorului, la frecvența industrială de 50 Hz (cu tensiune aplicată), se execută supunîndu-se pe rînd încercării întîi înfășurarea de joasă tensiune, apoi cea de înaltă tensiune.

Încercarea începe prin aplicarea pe înfășurare a unei tensiuni de 30% din tensiunea de încercare. Tensiunea se ridică lent pînă la valoarea tensiunii de încercare, la care se va menține timp de 1 min, apoi se coboară lent pînă la zero.

Transformatorul se consideră bun dacă în timpul probelor nu se produc conturnări sau străpungeri, care se manifestă atît prin zgomote caracteristice, cît și prin oscilarea pronunțată a acelor aparatelor de măsură (ampermetre, voltmetre).

Verificarea rigidității dielectrice a izolației transformatorului cu tensiune indusă. Încercarea constă în aplicarea unei tensiuni mai mari decît cea nominală pe înfășurările de joasă tensiune ale transformatorului, înfășurările de înaltă tensiune ale acestuia rămînînd deschise. Față de prima, metoda prezintă avantajul că, în aceste condiții, fiecare spiră a înfășurării este supusă unei tensiuni mai mari decît cea nominală.

Schema de realizare a probei este indicată în figura 23.2, metoda de lucru fiind aceeași ca și în cazul precedent.

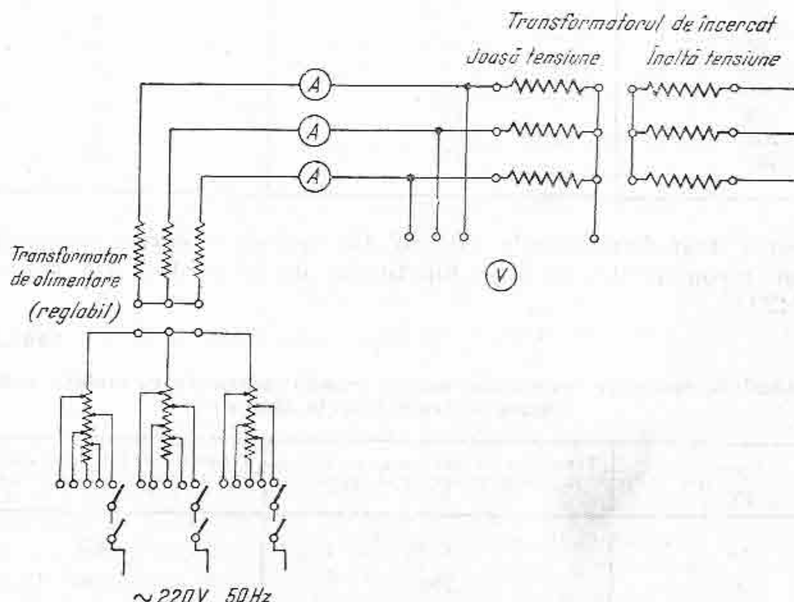


Fig. 23.2. Schema de verificare a rigidității dielectrice a izolației transformatoarelor de putere, cu tensiune indusă.

Frecvența tensiunii de încercare va fi funcție de utilajul care există la dispoziție (generator de frecvență de 100—400 Hz sau numai frecvența industrială de 50 Hz).

Durata de încercare cu tensiunea de 50 Hz va fi de 1 min.

C. MĂSURĂRI ȘI ÎNCERCĂRI LA TRANSFORMATOARELE DE CURENT

1. MĂSURAREA REZISTENȚEI DE IZOLAȚIE A ÎNFĂȘURĂRILOR

Această încercare se execută cu megohmmetrul, la temperaturi cuprinse între +10 și +30 °C. Rezultatele măsurărilor se compară cu datele din buletinul de fabricație sau cu valorile obținute la punerea în funcțiune, față de care trebuie să nu scadă:

— sub 70%, la transformatoarele cu tensiunea nominală mai mică de 110 kV;

— sub 85%, la transformatoarele cu tensiunea nominală mai mare sau egală cu 110 kV.

Valoarea măsurată trebuie să depășească 50 MΩ, pentru înfășurarea de înaltă tensiune, și 2 MΩ pentru înfășurarea de joasă tensiune.

Se măsoară rezistența de izolație a:

a) înfășurărilor de înaltă tensiune față de masă și a înfășurărilor de înaltă tensiune față de înfășurările secundare;

b) înfășurărilor secundare față de masă și între ele.

Înainte de încercare se verifică starea megohmmetrului, astfel:

— cu bornele megohmmetrului izolate se rotește manivela cu turație nominală; în acest caz, valoarea indicată trebuie să fie infinit;

— se scurtcircuitează bornele și se execută aceeași operație, caz în care megohmmetrul trebuie să indice valoarea zero.

Pentru efectuarea măsurărilor menționate la punctul *a*) se conectează megohmmetrul de 2 500 V la borna de înaltă tensiune (înfășurarea primară) și corpul metalic pus la pămînt, respectiv la una dintre bornele înfășurării secundare. Măsurarea se repetă pentru fiecare înfășurare secundară în parte.

Pentru efectuarea măsurărilor menționate la punctul *b*) se conectează megohmmetrul la borna înfășurării secundare și corpul metalic pus la pămînt. Măsurarea se repetă pentru fiecare înfășurare secundară în parte.

Cordoanele utilizate vor fi de tip „magnetou" (cu izolație sporită), cu secțiuni de 2,5 mm^2 cupru, avînd la capete papuci cositoriți.

În timpul măsurărilor, megohmmetrul trebuie așezat în poziție orizontală, pe o placă din material izolant și uscat, iar conductoarele de legătură suspendate în aer, fără a veni în atingere între ele sau cu vreun alt corp.

Valoarea rezistenței se măsoară după ce tensiunea a fost aplicată continuu timp de un minut. Totodată se măsoară și temperatura.

În tabelul 23.10 se dau unele valori orientative ale rezistenței de izolație ale înfășurărilor de înaltă tensiune, obținute în exploatare.

Măsurarea se efectuează la puneri în funcțiune, după reparații, înainte și după încercarea cu tensiunea mărită, precum și la revizii tehnice.

TABELUL 23.10

Valori orientative ale rezistenței de izolație a înfășurărilor de înaltă tensiune ale transformatoarelor de curent

Tensiunea nominală a înfășurării	Starea transformatorului	Valori medii de exploatare ale rezistenței de izolație, în MΩ, la diverse temperaturi, în °C				
		5	10	20	30	40
Pînă la 10 kV inclusiv	După reparare	5 400	3 700	1 700	810	450
	În exploatare	3 300	2 150	1 000	570	240
De la 10 kV pînă la 35 kV inclusiv	După reparare	8 000	5 400	2 500	1 170	600
	În exploatare	4 800	3 250	1 450	700	360
Peste 35 kV	După reparare	10 000	9 500	4 400	2 100	1 200
	În exploatare	8 400	5 400	2 400	1 200	600

2. MĂSURAREA TANGENTEI UNGHIULUI DE PIERDERI DIELECTRICE ȘI A CAPACITĂȚII IZOLAȚIEI

Măsurarea se execută cu puntea Shering, la transformatorele de 110—400 kV. Operația se efectuează, de preferință, la tensiunea nominală a transformatorului, dar nu sub 10 kV, ridicîndu-se, atunci cînd este posibil, curba tangentei unghiului de pierderi dielectrice în funcție de tensiune.

Măsurarea se execută la temperaturi cuprinse între +10 și +30 °C. Rezultatele se compară cu valorile din buletinul de fabricație sau cu valorile la punerea în funcțiune.

Pentru măsurarea tangentei unghiului de pierderi dielectrice (tg δ) și a capacității de izolare se folosesc (fig. 23.3):

— puntea de curent alternativ în montaj Shering, tip MD-16 în schemă normală;

— un transformator de tensiune TT, 10/0,1 kV;

— condensator-etalon CN, de 50 pF;

— autotransformator reglabil ART, 8 A, 220/250 V;

— tambur de alimentare;

— două siguranțe;

— voltmetru c.a. 0—260 V;

— tija de descărcare;

— transformator de curent de verificat TCv;

— lampă cu neon LN pentru indicarea prezenței tensiunii tip ISB 11—220 V, 2 m A, soclu E 14;

— rezistență de protecție R_p, 40 kΩ.

Întreaga aparatură necesară încercării se aduce în imediata apropiere a transformatorului de încercat.

Zona de lucru se va delimita fizic, prin îngrădiri provizorii, mobile, avînd prevăzute pe partea interioară plăcile avertizoare privind interzicerea depășirii acestor îngrădiri de către personalul care execută măsurarea tan-

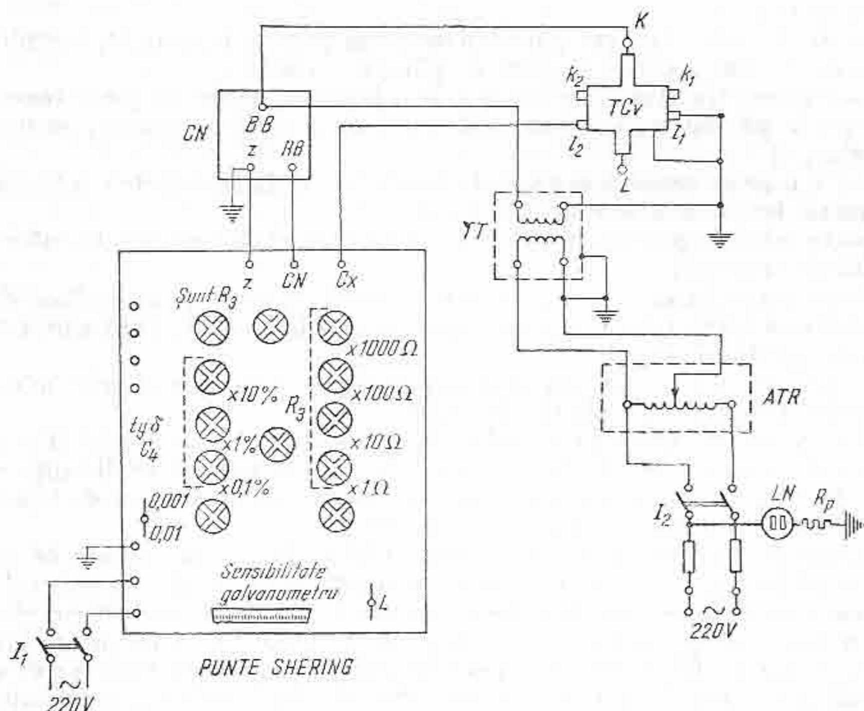


Fig. 23.3. Schemă pentru măsurarea tangentei unghiului de pierderi dielectrice și a capacității de izolație, la transformatoarele de curent.

gentei unghiului de pierderi, iar pe partea exterioară, plăci avertizoare privind interzicerea pătrunderii în interiorul îngrădirii a personalului care nu participă la executarea acestei măsurări.

Deoarece măsurarea se execută cu tensiune mărită, zona de lucru se va împărți, tot printr-o îngrădire mobilă provizorie, în:

— zona de lucru în care se amplasează obiectul de măsurat, condensatorul etalon, transformatorul de măsurare, capacul punții Shering cu izolatorul de înaltă tensiune și cablurile ecranate;

— zona de lucru în care se amplasează corpul punții, autotransformatorul reglabil, voltmetrul, întreruptorul și personalul care execută măsurarea.

Corpul punții se așază în afara îngrădirii, astfel încît capacul să fie la nivelul îngrădirii, iar izolatorul de înaltă tensiune, împreună cu cablurile ecranate, să se afle în îngrădire. În zona îngrădită se vor amplasa, de asemenea, transformatorul de încercare, condensatorul etalon și transformatorul de curent de verificat *TCv*.

Instalaţia de reglare şi transformatorul de încercat nu se vor aşeza la distanţă mai mică de 0,5 m faţă de punte, decît în cazul lipsei de spaţiu, cînd s-a constatat că nu se induc influenţe electromagnetice neadmisibile.

Puntea se va aşeza astfel, încît razele de lumină să nu cadă direct pe scală şi să împiedice observarea benzii luminoase.

După amplasarea utilajelor se trece la executarea montajului în următoarea ordine:

— se deschide capacul punţii şi se pune puntea la pămînt, legîndu-se borna de pămînt a punţii la priza de pămînt a staţiei;

— carcasa transformatorului *TT* şi o bornă a reţelei de joasă tensiune se leagă la pămînt prin intermediul prizei de punere la pămînt, existentă în staţie;

— la o priză specială se leagă la pămînt unul dintre capetele înfăşurării de înaltă tensiune a transformatorului *TT*;

— se leagă la pămînt tija de descărcare a celeilalte borne a transformatorului de încercat;

— se leagă bornele de alimentare a punţii la reţea şi se verifică dacă la închiderea întreruptorului punţii apare banda luminoasă, după care întreruptorul punţii se deschide;

— se deschide capacul din spatele punţii şi se introduce în priză mînerul de înaltă tensiune cu cablurile ecranate.

La executarea montajului trebuie avut în vedere ca legăturile şi cablurile ecranate să nu se apropie de obiectele puse la pămînt la distanţa mai mică de 100—150 mm. La nevoie se vor fixa de izolatoare sau de tije izolante, cu lungimea de cel puţin 200—250 mm.

Legătura la borna *BB* a condensatorului etalon se va depărta de cuva *CN* la minimum 100—150 mm. Dacă distanţa de la punte la obiectul de încercat este mică, se vor face bucle pe cablu fixîndu-se buclele cu sfoară sau cu bandă albă. Cablul ecranat se poate prelungi cu un cablu neecranat de maximum 1—1,5 m lungime. Dacă trebuie prelungit mai mult, se va utiliza cablu ecranat, legîndu-se ecranele între ele. Dacă obiectul are o capacitate mai mare decît 10 pF, se poate utiliza pentru prelungiri cablu neecranat de orice lungime.

Pentru alimentarea transformatorului de încercare se recomandă folosirea unui întreruptor cu separare vizibilă a circuitului.

De asemenea, pentru alimentarea transformatorului de încercare *TT* este necesar să se respecte schema de legare la reţea (fază-nul) din figură, foarte uşor de verificat prin intermediul lămpii cu neon *LN*, care nu se aprinde decît în cazul în care montajul este executat corect.

După terminarea montajului se verifică existenţa şi siguranţa legăturilor la pămînt, izolarea conductoarelor faţă de pămînt, existenţa îngrădirilor şi a plăcuţelor avertizoare.

După îndepărtarea persoanelor din zona periculoasă se ridică legarea la pămînt provizorie de pe borna de înaltă tensiune a transformatorului de încercare. Din acest moment, instalaţia se consideră sub tensiune şi se interzice apropierea altor persoane de instalaţie, cu excepţia operatorului echipat cu cizme şi mănuşi izolante, care trebuie să stea numai pe podeţul izolant.

Se aduc toate manetele punţii la zero, maneta şunturilor în poziţia determinată conform tabelului 23.11, maneta instalaţiei de reglare în poziţie corespunzătoare valorii — zero tensiune ieşire.

Se închid întreruptoarele I_1 şi I_2 şi se ridică încet tensiunea pînă la valoarea necesară. Dacă în timpul ridicării tensiunii sau în timpul încercării apar fenomene anormale, ca: străpungeri, conturnări, pocnituri, intrarea unei persoane în zona îngrădită, se întrerupe imediat tensiunea, se aplică punerea la pămînt provizorie pe borna de înaltă tensiune a transformatorului de încercare şi se elimină fenomenele nedorite.

După efectuarea măsurării se reduce treptat tensiunea la zero, se deschid întreruptoarele I_1 şi I_2 şi se leagă la pămînt borna de înaltă tensiune a transformatorului de încercare.

Numai după aceasta se poate pătrunde în zona îngrădită pentru a se efectua legăturile necesare măsurărilor ulterioare.

Cu ajutorul întreruptorului punţii se conectează iluminarea galvanometrului şi se verifică apariţia unei benzi luminoase înguste. Poziţia benzii trebuie să nu difere de poziţia zero a scării cu mai mult de cinci diviziuni.

Comutatorul de polaritate al punţii se fixează pe una dintre poziţiile extreme pozitive.

Alegerea poziţiei manetei şuntului se face în funcţie de capacitatea obiectului de încercat conform tabelului 23.11.

TABELUL 23.11

Poziţia manetei şuntului

Poziţia şuntului	1,25	0,15	0,06	0,025	0,01
C_x, $pF_{max\ adm}$	400 000	48 000	19 400	8 000	3 000
n	4	10	25	60	$100 + R_3$

După alegerea poziţiei manetei şuntului se măreşte sensibilitatea galvanometrului pînă cînd banda luminoasă ocupă 1/3—1/2 din scală. Rotindu-se maneta acordului pe frecvenţă se obţine lăţimea maximă a benzii luminoase.

Dacă banda se apropie de marginile scării, se va micşora sensibilitatea galvanometrului.

Se introduce treptat rezistenţa R_3 pînă cînd se obţine lăţimea minimă a benzii luminoase. Se introduce capacitatea C_4 pînă la îngustarea minimă a benzii, mărindu-se treptat sensibilitatea galvanometrului spre maximum, se continuă corectarea lui R_3 şi C_4 pînă cînd banda se îngustează la valoarea iniţială; spre sfîrşit se va utiliza şi rezistenţa liniară ρ a punţii.

În momentul atingerii sensibilităţii maxime (diviziunea 10) se va corecta acordarea pe frecvenţă, după care se va continua echilibrarea punţii.

Se notează valorile R_3, ρ şi tg δ, precum şi poziţia comutatorului şuntului.

Se repetă măsurarea schimbîndu-se polaritatea la galvanometru.

Se poate calcula capacitatea formată de transformatorul de verificat cu relaţia:

$$C_x = C_N R_4 \frac{100 + R_3}{n(R_3 + \rho)}, \tag{23.10}$$

în care: $C_N = 50 \cdot 10^{-6}\ \mu F$; $R_4 = 3 \cdot 184\ \Omega$; tg δ (%) $= C_4 \cdot 100$ se citeşte direct pe scară; R_3 şi ρ sînt valorile măsurate, iar n este valoarea

luată din tabelul 23.11. Valoarea reală este media aritmetică a celor două măsurări.

Măsurarea se efectuează la puneri în funcţiune, după reparaţii, în ateliere, după decuvarea sau schimbarea uleiului şi o dată la 2 ani.

3. ÎNCERCAREA IZOLAŢIEI ÎNFĂŞURĂRII SECUNDARE CU TENSIUNE ALTERNATIVĂ MĂRITĂ

Această încercare se execută timp de 1 min, valoarea tensiunii de încercare fiind:

— 2 kV, între înfăşurările secundare şi faţă de masă, precum şi între înfăşurările primare comutabile;

— 4 kV, la transformatoarele cu un curent secundar de 1 A şi puteri mai mari sau egale cu 30 VA.

În timpul încercării trebuie să nu apară străpungeri sau conturnări.

Măsurarea se efectuează la puneri în funcţiune, după reparaţii, după decuvare sau schimbarea uleiului, precum şi o dată la 2 ani.

4. ÎNCERCAREA IZOLAŢIEI ÎNFĂŞURĂRII PRIMARE CU TENSIUNE ALTERNATIVĂ MĂRITĂ

Înainte de efectuarea probei cu tensiunea alternativă mărită este necesar să se cunoască rezultatele corespunzătoare de la verificarea uleiului la transformatorul respectiv.

Transformatoarele de curent se încearcă numai prin metoda tensiunii aplicate.

Valorile tensiunilor de încercare a transformatoarelor de măsură noi, precum şi cele care se aplică transformatoarelor din exploatare sînt cuprinse în tabelul 23.12.

TABELUL 23.12

Valorile tensiunilor de încercare a izolaţiei pentru transformatoarele de curent fabricate în ţara noastră, curent alternativ 50 Hz, în kV

U_{nom}	0,5	6	10	15	20	25	30	35	60	110	220	400
U_{inc}	2,7	19,8	25,2	34,2	45	54	63	72	126	166,5	324	567

Pentru încercare se utilizează schema din figura 23.4, în care:

LN este lampa cu neon pentru indicarea fazei, tip ISB-11 220 V, 2 mA, soclu E 14;

R_p — rezistenţa de protecţie de 40 kΩ;

ATR — autotransformator reglabil 8 A, 220/0—250 V;

V — voltmetru c.a. 0—260 V;

TT — transformator de tensiune;

TCv — transformator de curent de încercat.

Tensiunea de încercare se aplică la una dintre bornele înfășurării primare, cealaltă bornă rămînînd liberă.

Bornele bobinajelor secundare se șuntează și se pun la pămînt împreună cu carcasa transformatorului *TCv* și cu una dintre bornele de joasă tensiune ale transformatorului *TT*.

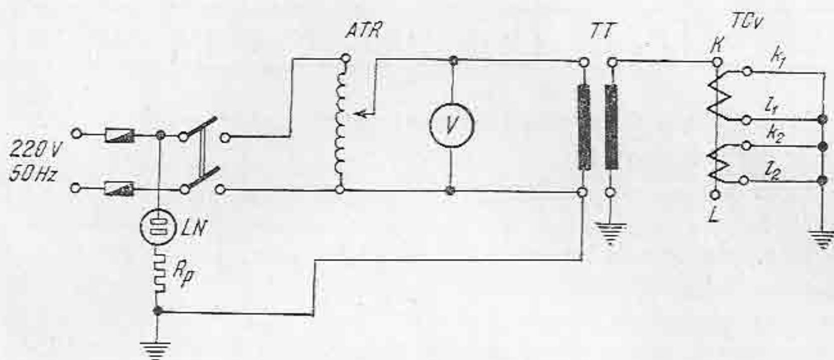


Fig. 23.4. Schemă pentru încercare cu tensiune alternativă mărită la transformatoarele d- curent.

La o priză specială se leagă la pămînt unul dintre capetele înfășurării de înaltă tensiune ale transformatorului de încercare *TT*.

În timpul încercării nu este permis să apară străpungeri, conturnări, efluvii pe suprafața carcasei izolante sau zgomote neobișnuite în interiorul transformatorului.

Încercarea se efectuează la puneri în funcțiune, după reparații, în atelier, după decuvare și schimbare a uleiului.

D. MĂSURĂRI ȘI ÎNCERCĂRI LA INTRERUPTOARELE DE PUTERE

Măsurarea rezistenței de izolare a elementelor dispozitivelor de acționare (electromagnet). Se măsoară cu megohmmetrul de 1 000 V valorile minime ale rezistenței de izolare trebuind să fie mai mari decît 5 MΩ, atît la puneri în funcțiune, cît și în exploatare.

Măsurarea se execută la puneri în funcțiune, reparații sau revizii tehnice.

Măsurarea rezistenței de izolare a părților mobile și fixe confecționate din materiale organice. Se efectuează cu megohmmetrul de 2 500 V, valorile minime orientative trebuind să fie: pentru întreruptoarele de 6 kV, mai mari decît 1 000 MΩ, pentru întreruptoarele de 10—35 kV, mai mari decît 3 000 MΩ, iar pentru întreruptoarele de peste 35 kV, mai mari decît 5 000 MΩ.

Măsurarea se efectuează la puneri în funcțiune, după reparații sau după revizii tehnice.

Încercarea izolației întreruptoarelor cu tensiune alternativă mărită la 50 Hz. Această încercare trebuie să se efectueze la valorile cuprinse în tabelul 23.13.

TABELUL 23.13

Valorile tensiunilor de încercare a izolației întreruptoarelor, în curent alternativ de 50 Hz, în kV

U_{nom}	6	10	15	20	25	30	35	60	110	220	400
$U_{înc}$	19,8	25,2	34,2	45,0	54,0	63,0	72,0	126,0	166,5	324	567

Izolația trebuie să suporte tensiunea de încercare timp de 1 min.

Încercarea se execută:

— între piesele sub tensiune și pămînt, pentru pozițiile închise ale întreruptorului;

— între piesele sub tensiune ale diferitelor faze, pentru pozițiile închise și deschise ale întreruptorului;

— între contactele deschise ale aceleiași faze.

Încercarea se execută la puneri în funcțiune sau după reparații.

Verificarea întreruptoarelor la închideri și deschideri repetate. Pentru verificarea întreruptoarelor se execută:

— 15 acționări la tensiunea, respectiv presiunea nominală;

— 5 acționări la tensiunea respectiv, presiunea minimă;

— 5 acționări la tensiunea, respectiv presiunea maximă.

Funcționarea trebuie să fie fără defecțiuni. Nu se face nici un reglaj în timpul acestor încercări.

Măsurarea se execută la puneri în funcțiune, după reparații sau o dată pe an.

E. MĂSURĂRI ȘI ÎNCERCĂRI LA SEPARATOARE

Măsurarea rezistenței de izolație a înfășurărilor dispozitivelor de acționare. Se efectuează cu megohmmetrul de 1 000 V, valoarea rezistenței de izolație trebuind să fie mai mare decît 5 MΩ.

Măsurarea se efectuează la puneri în funcțiune, după reparații sau la revizii tehnice.

Măsurarea rezistenței de izolație a tijelor izolante de acționare. Se efectuează cu megohmmetrul de 2 500 V, rezistențele de izolație trebuind să nu fie mai mici decît:

— 1 000 MΩ, la separatoare cu tensiunea nominală mai mică sau egală cu 10 kV;

— 3 000 MΩ, la separatoare cu tensiunea nominală mai mare decît 10 kV.

Măsurarea se efectuează la puneri în funcțiune, reparații sau revizii tehnice.

Încercarea izolației separatoarelor cu tensiune alternativă mărită la 50 Hz. Valorile de încercare trebuie să corespundă cu cele din tabelul 23.14.

TABELUL 23.14

Valorile tensiunilor de încercare a izolației separatoarelor, în curent alternativ de 50 Hz

U_{nom}, kV	1	6	10	15	20	25	35	60	110	220	400
U_{inc}, kV între contactele deschise	12,6	31,5	40,5	54,0	67,5	81,0	108,0	171,0	225,0	481,0	828,0
U_{inc}, kV față de masă și între poli	9,0	24,3	31,5	40,5	49,5	60,3	76,5	126,0	166,5	355,5	612,0

La separatoarele de exterior se recomandă ca încercarea izolației față de masă să se facă pînă la tensiunea de conturnare.

Izolația trebuie să reziste la tensiunea de încercare timp de 1 min; pentru izolatoare avînd piese cu izolație organică, durata este de 5 min.

Încercarea se efectuează la puneri în funcțiune, după reparații sau o dată la 5 ani.

Verificarea separatorului la închideri și deschideri repetate. În acest scop se vor executa următoarele cicluri:

— 15 cicluri la tensiunea, respectiv presiunea nominală;

— 5 cicluri la tensiunea, respectiv presiunea minimă;

— 5 cicluri la tensiunea, respectiv presiunea maximă.

Verificarea se efectuează la puneri în funcțiune, după reparații sau o dată la 5 ani.

F. ÎNCERCAREA IZOLAȚIEI CABLURILOR ELECTRICE CU TENSIUNE REDRESATĂ MĂRITĂ

Această încercare se efectuează la cabluri cu tensiunea nominală mai mare decît 1 kV, astfel:

— la cabluri cu cîmp neradial, tensiunea se aplică succesiv între două conductoare legate între ele și celălalt conductor legat la mantaua metalică și pămînt;

— la cabluri cu cîmp radial, tensiunea se aplică între fiecare conductor și mantaua de plumb sau ecranul corespunzător fazei respective, la care se leagă celelalte faze.

Valoarea tensiunii de încercare și duratele de încercare sînt:

a) La puneri în funcțiune pentru cabluri cu *izolație din hîrtie*, în conformitate cu tabelul 23.15.

b) Pentru *cabluri cu izolație din PCV*, în conformitate cu tabelul 23.16.

c) După reparații și în exploatare, pentru *cabluri cu izolație de hîrtie* sau PCV, în conformitate cu tabelul 23.17.

TABELUL 23.15

Valorile de încercare a izolației cablurilor cu izolație de hîrtie, cu tensiune redresată, în kV

Tipul cablului	Tensiunea nominală, kV				Durata încercării min
	6–10	15–35	110	220	
Cu cîmp radial	$3{,}3\ U_n$ —	$3{,}3\ U_n$ —	— $4\ U_0$	— $4\ U_0$	60 15
Cu cîmp neradial	$4{,}5\ U_n$	$4{,}5\ U_n$	—	—	30

TABELUL 23.16

Valorile de încercare a izolației cablurilor cu izolație de PCV, cu tensiune redresată, în kV

Tipul cablului	Tensiunea nominală, kV		Durata încercării min
	6	10	
Cu cîmp radial	$5{,}3\ U_n$	$4{,}75\ U_n$	15
Cu cîmp neradial	$5{,}3\ U_n$	$4{,}75\ U_n$	15

TABELUL 23.17

Valorile de încercare a izolației cablurilor, după reparații sau în exploatare, cu tensiune redresată (cabluri cu izolație de hîrtie sau PCV), în kV

Tipul cablului	Tensiunea nominală, kV				Durata încercării min
	6–10	15–35	110	220	
Cu cîmp radial	$3{,}3\ U_n$	$3{,}3\ U_n$	$3{,}2\ U_0$	$3{,}2\ U_0$	5
Cu cîmp neradial	$4{,}5\ U_n$	$4{,}5\ U_n$	—	—	5

d) Pentru *cazurile în care tensiunea de serviciu este mai mare decît tensiunea nominală a cablurilor* (de exemplu, cabluri de 6 kV funcționînd la 10 kV, sau cabluri de 15 kV funcționînd la 20 kV), tensiunile de încercare sînt cele din tabelul 23.18.

e) În cazul *cablurilor cu izolație de hîrtie joncționate cu cabluri cu izolație din PCV*, tensiunea de încercare va corespunde celei mai mici tensiuni de încercare prescrise.

TABELUL 23.18

Tensiunile de încercare ale cablurilor care funcţionează la o tensiune de serviciu mai mare decît tensiunea nominală, în kV

Momentul încercării	Tipul cablului	Cablu de 6 kV trecut la 10 kV	Cablu de 15 kV trecut la 20 kV
În momentul trecerii	Cu cîmp radial	6,5 U_0	6,0 U_0
	Cu cîmp neradial	6,5 U_n	6,0 U_n
Reparaţii sau în exploatare	Cu cîmp radial	5,0 U_0	5,0 U_0
	Cu cîmp neradial	5,0 U_n	5,0 U_n

În cele de mai sus, prin cabluri cu cîmp radial se înţeleg cablurile executate monofilar sau cu mai multe conductoare, însă cu manta metalică sau ecran individual pe fiecare fază, iar prin cablu cu cîmp neradial, cablurile executate cu mai multe conductoare, cu izolaţie de centură şi manta metalică sau ecran comun.

La cabluri cu tensiunea egală sau mai mare de 110 kV, încercarea cu tensiune mărită redresată nu se execută decît la cererea beneficiarului. În general, această probă este înlocuită cu măsurarea rezistenţei de izolaţie cu megohmmetrul de 2 500 V, cu o aplicare a tensiunii timp de 60 s.

La cabluri cu tensiuni sub 1 kV, încercarea cu tensiunea mărită redresată nu se execută, fiind înlocuită cu măsurarea rezistenţei de izolaţie cu megohmmetrul de 1 000 V.

În timpul încercării cablului trebuie să nu se producă străpungeri sau conturnări. Pe toată durata încercării se va urmări curentul de fugă. Valorile acestuia nu se normează. Valorile măsurate se compară cu datele din buletinul de fabricaţie sau cu valorile anterioare.

Curentul de fugă trebuie să nu prezinte variaţii la aplicarea tensiunii de încercare. Coeficientul de asimetrie al curenţilor de fugă pe faze trebuie să fie:

$$a = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{min}} \leqslant 2. \qquad (23.11)$$

În cazul în care curenţii de fugă depăşesc valorile măsurate anterior, precum şi în cazul unor coeficienţi de asimetrie mai mari decît 2, se va ridica şi curba curentului de fugă, în funcţie de tensiunea de încercare. Tensiunea se va ridica în trepte, curentul de fugă stabilizat citindu-se după 1 min de la atingerea tensiunii corespunzătoare fiecărei trepte. Curba curentului de fugă, în funcţie de tensiunea de încercare, trebuie să fie practic liniară, fără a prezenta frînturi de la o tensiune de încercare la alta.

Măsurările se execută cu ocazia punerii în funcţiune, după reparaţii, la un an după punerea în funcţiune, la un an de la trecerea tensiunii de funcţionare la tensiune superioară sau o dată la trei ani.

REZUMAT

- Controlul calității lucrărilor de reparații constă într-o serie de măsurări și încercări la:
  - — generatoare și compensatoare sincrone;
  - — transformatoare de putere, autotransformatoare și bobine;
  - — transformatoare de măsurare;
  - — întreruptoare;
  - — separatoare;
  - — cabluri etc.

- În majoritatea cazurilor se efectuează în principal:
  - — măsurarea rezistențelor de izolație și a coeficientului de absorbție;
  - — încercarea cu tensiune continuă a înfășurărilor de curent alternativ și cu tensiune alternativă a celor de curent continuu;
  - — măsurarea tangentei unghiului de pierderi dielectrice.

ÎNTREBĂRI RECAPITULATIVE

1. *Care sînt componentele curentului absorbit la încercarea cu tensiune mărită?*
2. *Cum se efectuează încercarea de mers în gol și a pierderilor de mers în gol?*
3. *Cum se efectuează măsurarea rezistenței de izolație și a coeficientului de absorbție la diversele elemente dintr-un sistem energetic?*
4. *Cum se efectuează măsurările cu tensiune alternativă mărită?*
5. *Cum se determină tangenta unghiului de pierderi dielectrice pentru diverse elemente?*

CUPRINS